



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**  
Engenharia

# **EFEITO DOS PROCESSOS BIOLÓGICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM AREIA ARGILOSA**

(Versão final após defesa)

**João Pedro Serrano Baptista**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**  
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Isabel Maria da Conceição F. Gonçalves Falorca

**Covilhã, novembro de 2017**



## Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família e amigos pelo apoio incondicional e constante motivação.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”*

Albert Einstein



## Agradecimentos

A realização do presente trabalho representa o culminar da fase mais importante do meu percurso académico, e como tal gostaria de expressar os meus agradecimentos a todos os que de alguma forma participaram e ajudaram na sua realização. Pela orientação científica e técnica, incentivo e amizade que ao longo do tempo me foram oferecidos.

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Doutora Isabel Maria C. F. G. Falorca, pela orientação, incentivo, confiança e acompanhamento constante e incondicional ao longo da realização da presente dissertação, tendo sido uma experiência muito enriquecedora e gratificante;

Ao Professor Doutor Abílio Silva, que contribuiu com os seus preciosos conhecimentos e ajuda na análise granulométrica da areia e da argila com o instrumento Coulter LS200;

Ao DECA da UBI, sobretudo pelos meios necessários ao desenvolvimento do trabalho;

Ao Centro de Ótica da UBI, em particular a Dra. Ana Gomes, que realizou a análise mineralógica por difração de raios X e a Microscopia Eletrónica de Varrimento das amostras;

À Sibelco Lda., na pessoa do Sr. Paulo Oliveira, que gentilmente forneceu a caulinite, indispensável à realização do trabalho experimental;

A toda a minha família, especialmente pais e avós, pelo porto seguro e amor incondicional ao longo de todo este percurso;

Aos clubes: Clube Desportivo “Os Patos”, Associação Desportiva do Fundão, União Desportiva Cariense e Associação Académica da Universidade da Beira Interior (futsal universitário) por terem sido uma segunda família ao longo deste meu percurso pela Covilhã e pelos momentos maravilhosos e êxitos conquistados;

A todos os amigos, colegas e professores pela amizade e ajuda ao longo deste árduo mas gratificante caminho.



## Resumo

A presente dissertação insere-se na análise da estabilidade de taludes sob o efeito dos processos biológicos.

Os processos através dos quais a biologia pode modificar as propriedades dos solos com interesse para a Engenharia Civil dependem do tipo de organismos envolvidos, nomeadamente, raízes de plantas, insetos e invertebrados e microrganismos. O efeito da atividade biológica sobre o comportamento de um solo argiloso tem interesse em algumas situações geotécnicas que envolvam problemas de estabilidade de taludes, tais como taludes naturais, diques e barragens de rejeitados. A consideração do solo como um ecossistema vivo oferece ainda o potencial de soluções inovadoras e sustentáveis para problemas geotécnicos. Este é um novo paradigma para muitos na engenharia geotécnica. Perceber o potencial desse paradigma requer uma abordagem multidisciplinar que abraça a biologia e a geoquímica para desenvolver técnicas de melhoramento dos terrenos.

Neste contexto, a presente dissertação pretende contribuir para melhorar o conhecimento sobre o comportamento dos solos contendo biopolímero e demonstrar a sua importância para a análise do comportamento das infraestruturas geotécnicas, em particular na estabilidade de talude em areia argilosa.

Para concretizar este objetivo, foram considerados diferentes métodos experimentais para a caracterização laboratorial do comportamento do material em condições saturadas. O estudo baseou-se em observações por MEV e em ensaios *Fall Cone*, *Vane Test* e edométricos de permeabilidade.

O presente estudo evidencia o efeito do biopolímero na estrutura do solo, promovendo a agregação das partículas mais finas, e o consequente aumento da permeabilidade e da resistência ao corte em condições não drenadas, demonstrando assim a importância da consideração deste processo biogeoquímico na análise da estabilidade de taludes.

## Palavras-chave

Processos biológicos, biopolímero, resistência ao corte, permeabilidade, estabilidade de taludes.





## Abstract

The present work is on the slope stability analysis, with scope in the study of the behavior of slopes when subjected to the effect of the biological processes.

The processes through which biology can modify soil properties of interest to Civil Engineering depend on the type of organisms involved, namely, plant roots, insects and invertebrates, and microorganisms. The effect of the biological activity on the behavior of a clayey soil is important in some geotechnical situations that involve slope stability problems, such as natural slopes, dikes and mine tailings storage facilities. Considering the soil as a living ecosystem still offers the potential of innovative and sustainable solutions to geotechnical problems. This is a new paradigm for many in geotechnical engineering. Realizing the potential of this paradigm requires a multidisciplinary approach that embraces biology and geochemistry to develop ground improvement techniques.

In this context, the present work intends to contribute to improve the knowledge about the behavior of soils incorporating a biopolymer and to demonstrate its importance for the analysis of the behavior of geotechnical infrastructures, in particular slope stability in clayey sand.

To achieve the proposed objective, different laboratory experimental methods were considered for the characterization of the behavior of the material under saturated conditions. The study was based on *Scanning Electron Microscopy* and *Fall Cone*, *Vane Test* and Oedometric permeability tests.

The present study evidences the effect of the biopolymer on the soil structure, promoting the aggregation of the finer particles, and the consequent increase of the permeability and the shear strength in undrained conditions, thus demonstrating the importance of the consideration of this biogeochemical process in the slope stability analysis.

## Keywords

Biological processes, biopolymer, undrained shear strength, permeability, slope stability.

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

# Índice

Capítulo 1 - Introdução .....	3
1.1 Enquadramento do tema .....	3
1.2 Objetivos do estudo .....	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Organização da dissertação .....	4
Capítulo 2 - Processos biológicos e estabilidade de taludes: estado do conhecimento .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Principais processos biológicos em Geotecnia.....	8
2.3 Efeitos nas propriedades dos solos .....	16
2.4 Biocompósitos .....	22
2.5 Discussão e Conclusão .....	24
Capítulo 3 - Programa Experimental .....	27
3.1 Introdução .....	27
3.2 Variáveis experimentais .....	27
3.2.1 Variáveis independentes e fixas .....	27
3.2.2 Variáveis dependentes.....	28
3.2.3 Descrição dos equipamentos .....	28
3.3 Caracterização dos materiais.....	32
3.3.1 Areia argilosa.....	32
3.3.2 Biopolímero.....	34
3.4 Procedimentos experimentais.....	35
3.4.1 Preparação das amostras.....	35
3.4.2 Caracterização da estrutura do material (MEV).....	35
3.4.3 Ensaio Fall Cone ou Cone Penetrómetro .....	36
3.4.4 Ensaio Vane Test.....	36
3.4.5 Ensaio Edométrico com permeabilidade .....	37
3.5 Discussão e conclusão.....	38
Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados.....	41
4.1 Estrutura do solo.....	41
4.2 Resistência ao corte não drenado .....	51
4.2.1 Ensaio Fall Cone .....	51
4.2.2 Ensaio Vane Test.....	53
4.3 Permeabilidade .....	55
4.4 Discussão e conclusão de resultados .....	58
Capítulo 5 - Conclusão e Desenvolvimento Futuro.....	63
5.1 - Considerações finais .....	63

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

5.2 - Principais conclusões .....	64
5.3 - Sugestões para investigações futuras .....	65
Referências Bibliográficas.....	67
Anexos .....	69
Anexo 1 - Caracterização do solo utilizado .....	75
A1. Características físicas do solo .....	75
Anexo 2 - Ensaio Laboratoriais .....	85

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Alteração dos parâmetros ecológicos e propriedades geotécnicas em função do tempo (adaptado de ((DeJong et al., 2013)) .....	9
Figura 2.2 - Efeito da adição de <i>S. pasteurii</i> : evolução de $qu_{ucs}$ com o tempo (Costa et al., 2012) .....	11
Figura 2.3 - Efeito da adição de <i>S. pasteurii</i> : evolução de $qu_{diam}$ com o tempo (Costa et al., 2012) .....	12
Figura 2.4 - Visão geral do campo experimental de estabilização de cascalho solto para a perfuração horizontal: (a) malha de poços de injeção; (b) amostra de cascalho estabilizado com PCIM; (c) instalação da conduta após perfuração horizontal; (d) mapa de resistividade antes e durante o tratamento (adaptado de DeJong et al., 2013) .....	13
Figura 2.5 - Resultado do tratamento com biofilme para a redução da permeabilidade: dados de campo que mostram a redução da percolação numa barragem após tratamento com biofilme para a redução da condutividade hidráulica (adaptado de DeJong et al., 2013) .....	14
Figura 2.6 - Redução da velocidade das ondas P devido à geração de gás de uma areia inicialmente saturada, considerando diferentes superfícies específicas (adaptado de DeJong et al., 2013) .....	15
Figura 2.7 -Deslocamento de uma raiz: a) zona de corte; b) pormenor (Mendonça e Cardoso, 1998) .....	19
Figura 2.8 -Modelo de interação solo-raiz para uma raiz flexível: a) zona de corte; b) força na raiz (Mendonça & Cardoso, 1998) .....	19
Figura 3.1 - Aparelho do Cone Penetrómetro automatizado .....	29
Figura 3.2 - Aparelho do Vane após a realização do ensaio .....	30
Figura 3.3 - Vista geral do edómetro de permeabilidade durante a realização do ensaio.....	31
Figura 3.4 - Corte esquemático da célula edométrica .....	31
Figura 3.5 - Curva granulométrica da areia argilosa.....	33
Figura 3.6 - Vista geral do Difratómetro de Raios X da UBI .....	33
Figura 3.7 - VP SEM Hitachi S - 3400N .....	36
Figura 4.1 - Imagem ampliada 100x do solo seco (0% biopolímero).....	42
Figura 4.2 - Imagem ampliada 100x do solo húmido (0% biopolímero) .....	42
Figura 4.3 - Imagem ampliada 100x do solo húmido (0,1% biopolímero) .....	43
Figura 4.4 - Imagem ampliada 5000x do solo seco (0% biopolímero) .....	44
Figura 4.5 - Imagem ampliada 5000x do solo húmido (0% biopolímero) .....	44
Figura 4.6 - Imagem ampliada 5000x do solo seco (0,1% biopolímero).....	45
Figura 4.7 - Imagem ampliada 5000x do solo húmido (0,1% biopolímero) .....	45
Figura 4.8 - Imagem ampliada 10000x do solo seco (0% biopolímero).....	46
Figura 4.9 - Imagem ampliada 10000x do solo húmido (0% biopolímero) .....	46
Figura 4.10 - Imagem ampliada 10000x do solo seco (0,1% biopolímero).....	47

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Figura 4.11 - Imagem ampliada 10000x do solo húmido (0,1% biopolímero) .....	47
Figura 4.12 - Imagem ampliada 15000x do solo seco (0% biopolímero) .....	48
Figura 4.13 - Imagem ampliada 15000x do solo húmido (0% biopolímero) .....	48
Figura 4.14 - Imagem ampliada 15000x do solo seco (0,1% biopolímero).....	49
Figura 4.15 - Imagem ampliada 15000x do solo húmido (0,1% biopolímero) .....	49
Figura 4.16 - Evolução da penetração do cone .....	51
Figura 4.17 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na resistência ao corte não drenado do solo .....	53
Figura 4.18 - Diagrama torque (T) versus ângulo de rotação do molinete ( $\theta$ ): amostra com $\epsilon = 0,05\%$ .....	53
Figura 4.19 - Diagrama torque (T) versus ângulo de rotação do molinete ( $\theta$ ): amostra com $\epsilon = 0,1\%$ .....	54
Figura 4.20 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na resistência ao corte não drenado do solo .....	55
Figura 4.21 - Resultados do ensaio de consolidação.....	55
Figura 4.22 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na permeabilidade do solo, para diferentes teores em água .....	58

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Plano de associação entre as variáveis experimentais .....	28
Tabela 3.2 - Características do solo .....	32
Tabela 3.3 - Análise mineralógica dos componentes da areia argilosa.....	34
Tabela 3.4 - Características do biopolímero .....	34
Tabela 4.1 - Penetração média e resistência ao corte não drenado ao longo do ensaio para a amostra com 0,05% de biopolímero. ....	52
Tabela 4.2 - - Penetração média e resistência ao corte não drenado ao longo do ensaio para a amostra com 0,1% de biopolímero. ....	52
Tabela 4.3 - Valores máximos da resistência ao corte não drenado em cada uma das amostras analisadas. ....	52
Tabela 4.4 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0% de biopolímero.....	56
Tabela 4.5 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0,05% de biopolímero.....	57
Tabela 4.6 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0,1% de biopolímero .....	57
Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de permeabilidade .....	58





## Lista de Acrónimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
MEV	Microscopia Eletrónica de Varrimento
PCIM	Precipitação de Calcite Induzida Microbiologicamente
SC	Areia Argilosa
SPE	Substâncias Poliméricas Extracelulares
UBI	Universidade da Beira Interior



## Simbologia

### Alfabeto Latino

$A_s$	Área de influência da raíz
$A_{Ri}$	Área da secção da raíz
$A_{Rm}$	Valor médio das secções transversais das raízes
$c$	Constante, dependente do ângulo da ponta do cone
$c'$	Coefficiente de coesão
$c_{ufc}$	Resistência ao corte não drenado pelo <i>Fall Cone</i>
$c_{uv}$	Resistência ao corte não drenado pelo <i>Vane Test</i>
$D$	Diâmetro
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
$D_{50}$	Diâmetro mediano
$e$	índice de vazios
$e_0$	índice de vazios inicial
$g$	Aceleração da gravidade
$G_s$	Densidade das partículas sólidas
$H_0$	Altura inicial
$I_c$	Índice de consistência
$I_p$	Índice de plasticidade
$i$	Média de penetração do cone; gradiente hidráulico
$K$	Constante do molinete
$k$	Permeabilidade
$L$	Comprimento
$L_{ai}$	Comprimento da amarração
$L_{aiMin}$	Comprimento da amarração mínimo
$m$	Massa do cone
$m_i$	Massa respeitante à fase i do ensaio
$N_f$	Número médio de raízes por unidade de área
$N^{\circ} \text{cáp.}$	Número da cápsula
$P$	Penetração; carga de rotura
$P_{final}$	Leitura final no <i>Fall Cone</i>
$P_i$	Penetração do cone

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

$P_{inicial}$	Leitura inicial no <i>Fall Cone</i>
$P_{médio}$	Penetração média
$p_{Ri}$	Perímetro médio da raiz
$q_{diam}$	Compressão diametral
$S_r$	Grau de saturação do solo
$T$	Torque
$T_i$	Temperatura respeitante à fase i do ensaio
$T_R$	Força de tração que se instala na raiz
$t_r$	Produto da resistência à tração das raízes
$v$	Velocidade média de percolação

## Alfabeto Grego

$\beta$	Ângulo que define a inclinação das raízes antes de se iniciar o corte
$\Delta e$	Variação do índice de vazios
$\Delta H$	Variação da altura da amostra
$\Delta P$	Variação da penetração
$\Delta \theta$	Variação do ângulo
$\Delta w$	Variação do teor em água
$\theta$	Ângulo que define a direção das raízes na banda de corte; ângulo de rotação do molinete
$\phi'$	Ângulo de atrito do solo
$\rho_s$	Massa volúmica das partículas
$\rho_w$	Densidade do líquido de controlo
$\rho_{wi}$	Densidade do líquido de controlo referente à $m_i$
$\sigma'$	Tensão normal efetiva
$\sigma_R$	Resistência à tração das raízes
$\omega$	Teor em água
$\omega_L$	Limite de liquidez
$\omega_P$	Limite de plasticidade
$\tau$	Resistência ao corte total
$\tau_a$	Resistência das interfaces
$\tau_R$	Resistência ao corte do reforço das raízes
$\tau_S$	Resistência ao corte dos solos





# Capítulo 1 - Introdução





# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento do tema

Os processos através dos quais a biologia pode modificar as propriedades dos solos com interesse para a Engenharia Civil dependem do tipo de organismos envolvidos, nomeadamente, raízes de plantas, insetos e invertebrados e microrganismos. O efeito da atividade biológica sobre o comportamento de um solo argiloso tem interesse em algumas situações geotécnicas que envolvam problemas de estabilidade de taludes, tais como taludes naturais, diques e barragens de rejeitados. A consideração do solo como um ecossistema vivo oferece ainda o potencial de soluções inovadoras e sustentáveis para problemas geotécnicos. Este é um novo paradigma para muitos na engenharia geotécnica. Perceber o potencial desse paradigma requer uma abordagem multidisciplinar que abraça a biologia e a geoquímica para desenvolver técnicas de melhoramento dos terrenos.

A modificação das propriedades do solo ao longo do tempo pode estar relacionada, em muitos casos, diretamente com os processos ecológicos. O período de tempo no qual as propriedades podem mudar, a sua magnitude e direção são únicas e, em alguns casos, não podem ser previstas ou conhecidas antes do tempo.

## 1.2 Objetivos do estudo

A presente dissertação tem como objetivo geral contribuir para o desenvolvimento do conhecimento de base científica do comportamento dos solos sujeitos a processos biológicos. Estes processos dependem do tamanho dos organismos, que vão desde raízes de plantas até insetos e invertebrados (por exemplo, formigas e vermes). A atividade biológica é frequentemente acompanhada por geração de biopolímeros nos poros dos solos. A presença deste tipo de sólidos orgânicos nos solos pode modificar as suas propriedades.

Assim os objetivos específicos são os seguintes:

- Caracterizar a composição e estrutura de uma areia argilosa, variando a concentração de biopolímero;
- Analisar e caracterizar o comportamento de uma areia argilosa, em termos da sua compressibilidade, condutividade hidráulica e resistência ao corte não drenado, variando a concentração do biopolímero;
- Conceptualizar o comportamento do material estudado e demonstrar a sua importância para a análise do comportamento das infraestruturas geotécnicas.

### **1.3 Metodologia**

A metodologia adotada na realização da dissertação passa por uma revisão bibliográfica sobre os principais processos biológicos utilizados na Geotecnia e respectivos potenciais de melhoria das propriedades dos solos, evidenciando casos de estudo; e uma investigação sobre o comportamento da areia argilosa contendo biopolímero através da realização de um programa de ensaios laboratoriais.

### **1.4 Organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos.

Capítulo 1: Introdução e enquadramento do trabalho, o estabelecimento dos objetivos, a metodologia adotada e a estruturação da dissertação.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os principais processos biológicos utilizados na Geotecnia e respectivos potenciais de melhoria das propriedades dos solos, evidenciando casos de estudo. Nesta abordagem também são explicados os conceitos e fundamentos que permitem estudar o efeito do reforço das raízes na avaliação da estabilidade de taludes através do modelo conceptual desenvolvido por Mendonça e Cardoso (1998).

Capítulo 3: Descrição do programa experimental, começando por definir as variáveis experimentais (independentes/fixas e dependentes), descrição dos materiais e dos equipamentos utilizados durante os ensaios laboratoriais e apresentação dos procedimentos dos ensaios.

Capítulo 4: Apresentação dos resultados experimentais e análise crítica dos mesmos. Os valores obtidos encontram-se organizados de modo sucinto nos Anexos A1 e A2.

Capítulo 5: São sintetizadas as principais conclusões extraídas dos capítulos anteriores e sugerem-se, como resultado da experiência adquirida com o estudo desenvolvido, algumas perspectivas para trabalhos futuros no âmbito da temática abordada.

## **Capítulo 2 - Processos biológicos e estabilidade de taludes: estado do conhecimento**



# Capítulo 2 - Processos biológicos e estabilidade de taludes: estado do conhecimento

## 2.1 Introdução

Os processos através dos quais a biologia pode modificar as propriedades dos solos com interesse para a Engenharia Civil dependem do tipo de organismos envolvidos, nomeadamente, raízes de plantas, insetos e invertebrados e microrganismos.

A consideração do solo como um ecossistema vivo permite ainda desenvolver soluções inovadoras e sustentáveis para os problemas geotécnicos. Perceber a potencialidade deste novo paradigma para desenvolver técnicas de melhoramento dos terrenos requer uma abordagem multidisciplinar que abrange a biologia e geoquímica (Dejong et al., 2013).

O aproveitamento dos processos biológicos nos solos promete ser a próxima prática transformadora na engenharia geotécnica. Durante muitos anos, a influência das raízes das plantas na estabilidade dos taludes foi reconhecida e explorada. Existe agora a oportunidade de explorar muitos processos químicos que são mediados pela biologia. Embora ignorados durante décadas em relação ao comportamento geotécnico, os micróbios são ubíquos nos solos em concentrações surpreendentemente altas, quase que independentemente da saturação, mineralogia, pH e de outros fatores ambientais. Perto da superfície do solo, existem mais de  $10^{12}$  micróbios por quilograma de solo. Para profundidades típicas em sistemas geotécnicos (por exemplo, 2 a 30 m), a população microbiana diminui para cerca de  $10^{11}$  a  $10^6$  microrganismos por quilograma, respetivamente. Os organismos vivos de outros tamanhos também estão presentes. Por exemplo, as minhocas (comprimento da ordem dos cm) compactam o solo, criam condições de drenagem preferenciais, afetando assim as características do solo; os esporos fúngicos (tamanho inferior a  $1 \mu\text{m}$ ) podem ser transportados para espaços porosos menores (Dejong et al., 2013).

A permanente presença biológica nos solos (os micróbios têm sido engenheiros geotécnicos ativos há mais de 3 mil milhões de anos, muito mais tempo do que os 200 mil anos para os seres humanos) oferece oportunidades para a engenharia geotécnica considerar o solo como um ecossistema vivo e não como um material de construção inerte. A atividade biológica no solo pode potencialmente explicar observações em alguns casos de estudo, que têm perturbado os especialistas e oferece a oportunidade de manipular o solo usando processos naturais ou estimulados (Dejong et al., 2013), como será desenvolvido mais à frente neste capítulo.

Neste capítulo 2 pretende-se fazer o enquadramento do problema do efeito dos processos biológicos nas obras geotécnicas, em particular na estabilidade de taludes, tendo por base a revisão da bibliografia considerada relevante para poder responder à seguinte questão: que processos biológicos podem ocorrer nos solos e qual a sua importância na estabilidade de taludes?

## 2.2 Principais processos biológicos em Geotecnia

Os processos através dos quais a biologia pode modificar as propriedades do solo dependem do tamanho dos organismos, em dimensão absoluta e em relação ao tamanho das partículas (Dejong et al., 2013).

Nesta secção pretende-se especificar quais são os principais processos biológicos utilizados em Geotecnia e quais as suas potenciais melhorias nas propriedades que interessam à Engenharia Civil. Os organismos multicelulares, que vão desde raízes de plantas até insetos e invertebrados (por exemplo, formigas e vermes) alteram os solos através de processos mecânicos e biológicos. Como referido na secção anterior, torna-se desafiador perceber a potencialidade de soluções inovadoras e sustentáveis para problemas geotécnicos que abrangem a biologia e a geoquímica de forma a desenvolver técnicas de melhoramento dos terrenos. Os processos geoquímicos biomediados, os quais consistem em uma reação geoquímica regulada pela microbiologia subterrânea, que atualmente estão a ser exploradas incluem a precipitação mineral, geração de gás, formação de biofilme e geração de biopolímero. Para cada um destes, são empregues processos microbianos para criar um ambiente propício às reações geoquímicas pretendidas entre os minerais, a matéria orgânica, os fluidos nos poros e os gases que constituem o solo (Dejong et al., 2013).

A seguir é feita uma descrição sumária dos processos biológicos e processos geoquímicos biomediados, em consonância com a Figura 2.1 que indica as modificações nos parâmetros ecológicos e nas propriedades geotécnicas dos solos ao longo do tempo.

A modificação das propriedades do solo ao longo do tempo pode estar relacionada, em muitos casos, diretamente com os processos ecológicos. O período de tempo no qual as propriedades podem mudar, a sua magnitude e direção são únicas e, em alguns casos, não podem ser previstas ou conhecidas antes do tempo. A Figura 2.1 contém uma série de gráficos que indicam esquematicamente as modificações para tamanhos de organismos desde micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) até metros (m). A coluna da esquerda representa os parâmetros ecológicos terrestres típicos que seriam variáveis enquanto a coluna da direita representa as propriedades geotécnicas típicas que seriam medidas. As tendências mostradas em cada diagrama são baseadas em estudos publicados, mas são apresentadas esquematicamente para enfatizar a magnitude das modificações nos parâmetros/propriedades em todos os tamanhos dos organismos. Como é evidente na Figura 2.1, a taxa de alteração ao longo do tempo, bem como a magnitude da

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

alteração, não é consistente ou constante. As tendências mostradas indicam em geral aumentos previsíveis em cada parâmetro, independentemente do tamanho dos organismos. O efeito nas propriedades geotécnicas é frequentemente menos claro. Contudo, observa-se que pode ser fornecida alguma orientação tendo por base o valor correspondente a um ecossistema de referência (DeJong, Tibbett, & Fourie, 2013).

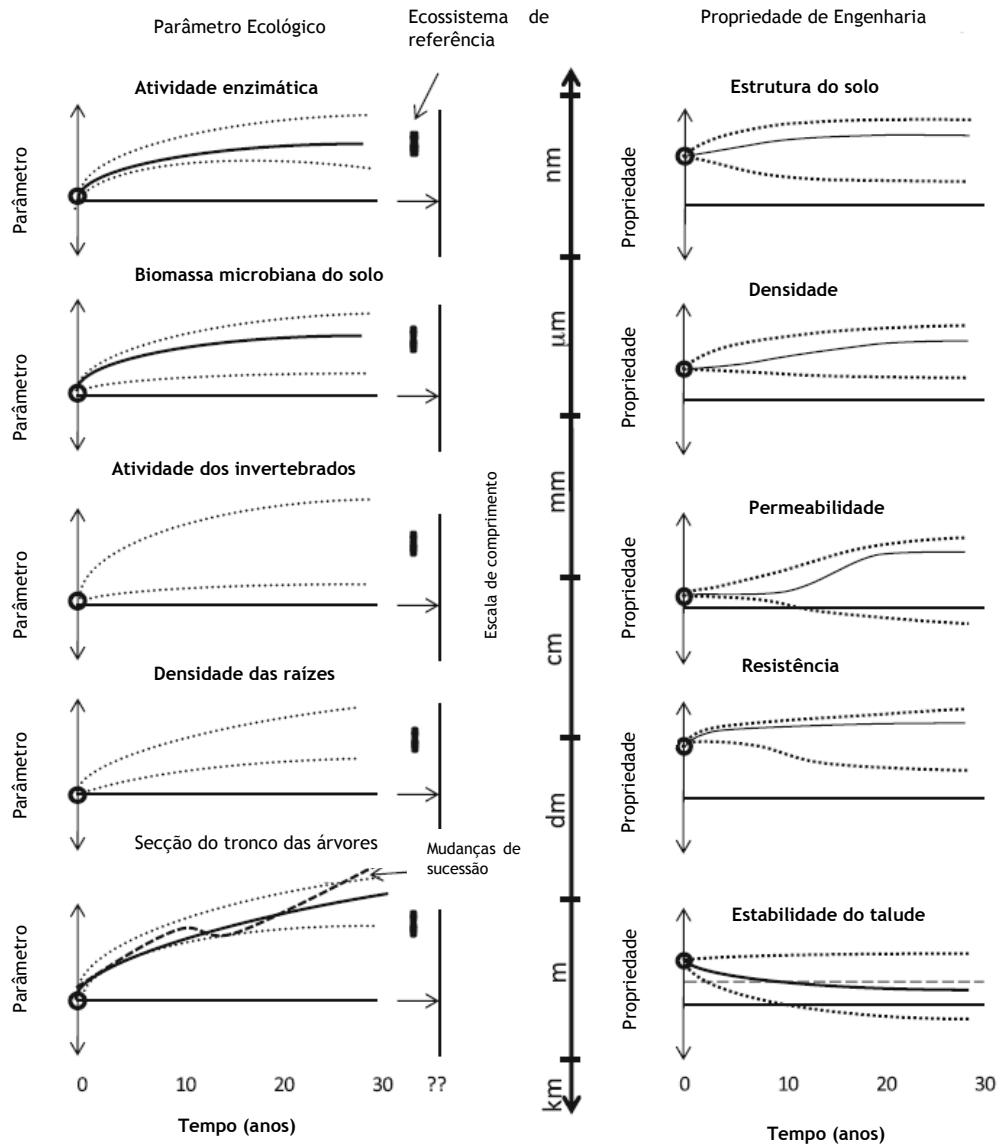


Figura 2.1 - Alteração dos parâmetros ecológicos e propriedades geotécnicas em função do tempo (adaptado de ((DeJong et al., 2013))

### Precipitação mineral

De acordo com o princípio inerente à estabilização química dos solos, o uso de biotecnologia também visa a união entre partículas do solo através de produtos cimentícios, no entanto, estes são de origem biológica, sendo obtidos por biomineralização. Na natureza a biomineralização é muito comum, consistindo na precipitação de um mineral proveniente da atividade celular de um ser vivo. Na engenharia, a biomineralização tem sido utilizada em diversas aplicações, como por exemplo, na proteção de superfícies de pedra e de betão (Costa, Venda Oliveira, da Costa, & Nobre, 2012).

O melhoramento das propriedades dos solos por bioestabilização deve-se fundamentalmente à precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por intermédio de diversos processos biológicos. A capacidade de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  é fundamentalmente condicionada por quatro fatores (Costa et al., 2012):

- i. a concentração de iões de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ );
- ii. a concentração da dissolução de carbono inorgânico;
- iii. o pH;
- iv. a disponibilidade de nucleação do local.

O processo de bioestabilização de um solo, através do fenómeno de biomineralização, envolve para além de condições circundantes propícias a esse processo, a presença de microrganismos como agentes precipitadores de  $\text{CaCO}_3$ . Quando se verifica uma forte presença de microrganismos nativos no solo, a bioestabilização passa pela estimulação desses microrganismos através de adição de compostos que lhes servem de alimento. Chama-se a este processo bioestimulação. Por sua vez, quando a quantidade de microrganismos presentes no solo é insuficiente, é necessário adicionar para além dos compostos que lhes sirvam de alimento, o próprio microrganismo, sendo esse processo designado por bioadição (Costa et al., 2012).

Segundo DeJong *et al.* (2013), a precipitação de calcite induzida microbiologicamente, ou PCIM, tem sido o foco principal de pesquisa em engenharia geotécnica. Na PCIM, a criação de carbonato de cálcio (calcite) ocorre como consequência da atividade metabólica microbiana. A precipitação de calcite pode ser conseguida por muitos processos diferentes, incluindo a hidrólise da ureia, a desnitrificação, a redução de sulfato, induzindo precipitação de dolomite e a redução de ferro, induzindo a precipitação de outros minerais. A hidrólise enzimática da ureia pelos micróbios é a mais eficiente, em termos de energia, destes processos e a urease é encontrada numa ampla gama de microrganismos e plantas. *Bacillus pasteurii* (American Type Culture Collection 6453), que foi recentemente reclassificado como *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859), uma bactéria alcalófila com enzima urease altamente ativa, tem sido utilizada em estudos laboratoriais onde a bioadição foi realizada para produzir precipitação de calcite.



No estudo efetuado por Costa *et al.* (2012) é analisada a evolução no tempo (30, 90 e 150 dias) da resistência induzida por *Sporosarcina pasteurii*. Os ensaios de compressão diametral permitiram avaliar a resistência à tração ( $q_{u_{diam}}$ ) de forma indireta, calculada através da expressão 2.1:

$$q_{u_{diam}} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad 2.1$$

representando P a carga de rotura do ensaio, D o diâmetro do provete e L o seu comprimento.

As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram o efeito do tempo de cura na evolução da resistência, devido à adição da bactéria *S. pasteurii*. Em termos gerais, constata-se um significativo aumento da resistência com o tempo de cura, tanto em termos de compressão simples como de compressão diametral. Estes resultados espelham o facto da eficácia dos microrganismos ser potenciada a longo prazo, ou seja, esta metodologia necessita de um tempo de maturação muito longo (Costa *et al.*, 2012).

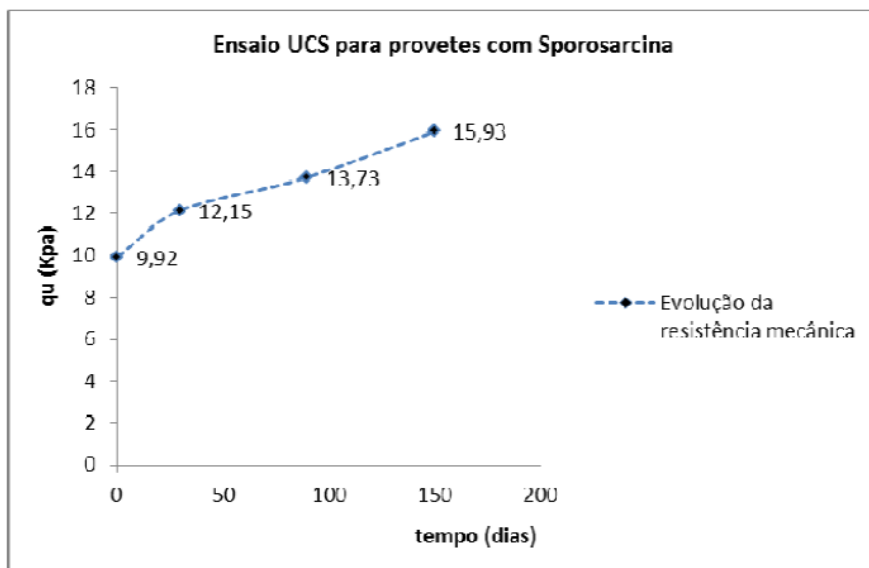


Figura 2.2 - Efeito da adição de *S. pasteurii*: evolução de  $q_{u_{ucs}}$  com o tempo (Costa *et al.*, 2012)

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

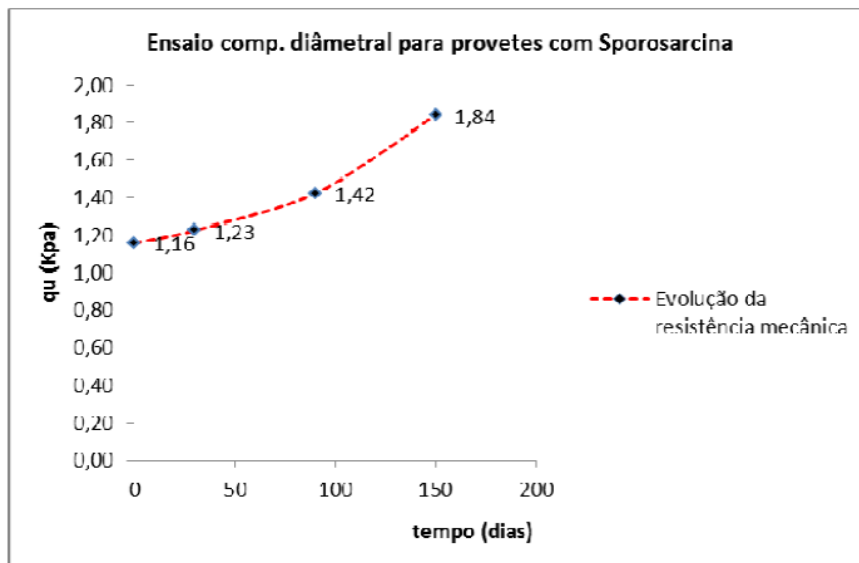


Figura 2.3 - Efeito da adição de *S. pasteurii*: evolução de  $q_{u\text{diam}}$  com o tempo (Costa et al., 2012)

Segundo DeJong *et al.* (2013) apenas foram realizados alguns ensaios de campo nos quais foram utilizados os microrganismos para aumentar a resistência e a rigidez dos solos por precipitação de carbonato induzida ou reduzir a condutividade hidráulica através da formação de biofilme. São referidos dois campos experimentais utilizando a precipitação de calcite induzida microbiologicamente: o primeiro utilizando uma estratégia de bioadição e o segundo utilizando estimulação das espécies indígenas para induzir a precipitação. O tratamento PCIM foi aplicado na estabilização do cascalho para permitir a perfuração horizontal para uma conduta de gás, na Holanda em 2010 (Figura 2.4).

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

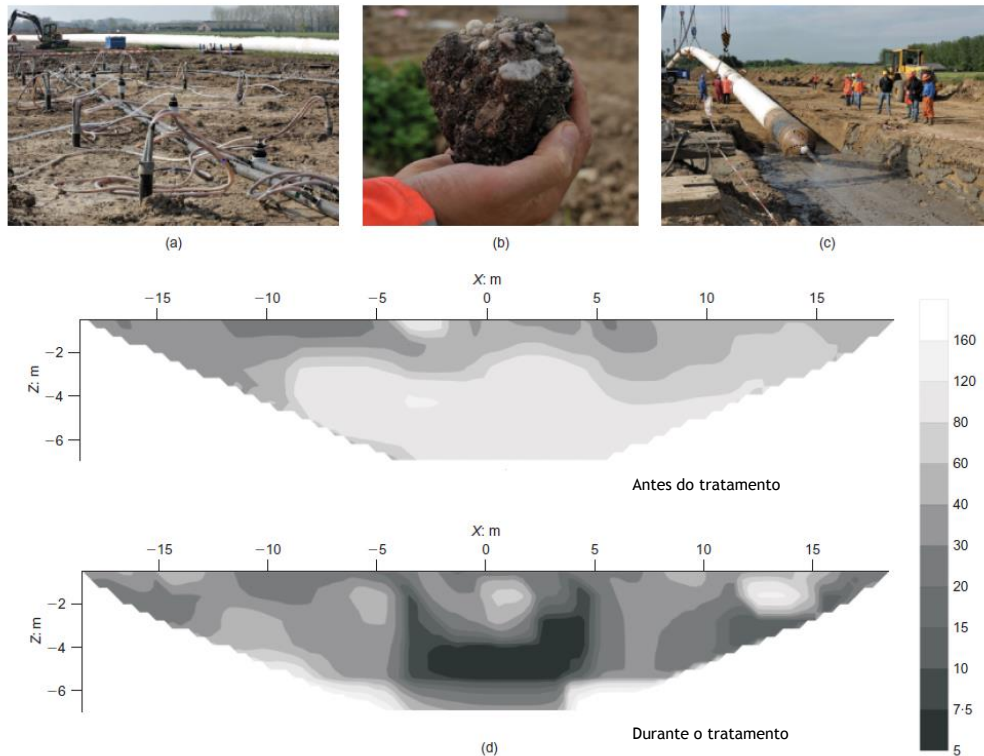


Figura 2.4 - Visão geral do campo experimental de estabilização de cascalho solto para a perfuração horizontal: (a) malha de poços de injeção; (b) amostra de cascalho estabilizado com PCIM; (c) instalação da conduta após perfuração horizontal; (d) mapa de resistividade antes e durante o tratamento (adaptado de DeJong et al., 2013)

O tratamento foi aplicado a um volume de  $1000 \text{ m}^3$  para profundidades variando entre 3 e 20 m abaixo da superfície. O tratamento envolveu a injeção de  $200 \text{ m}^3$  de uma suspensão bacteriana cultivada em laboratório, duas injeções de  $300\text{-}600 \text{ m}^3$  de solução reagente contendo ureia e cloreto de cálcio, e extração de águas subterrâneas até a condutividade elétrica e as concentrações de amônio retornarem a valores constantes. O PCIM foi monitorizado usando resistividade elétrica, amostragem de águas subterrâneas e amostragem de solo para medições do teor em calcite, com diferentes graus de sucesso. No geral, o tratamento de PCIM foi um sucesso, uma vez que a perfuração horizontal foi possível sem instabilidade no maciço de cascalho solto (Dejong et al., 2013) .

Noutro campo experimental, a PCIM utilizando bioestimulação foi aplicada para avaliar a capacidade de co-precipitação de metais pesados (estrôncio-90) com carbonato de cálcio (para imobilizar os metais pesados). Estes ensaios envolveram a injeção de melão dissolvido e ureia na zona a tratar (cálcio disponível nas águas subterrâneas), com extração simultânea de água subterrânea num poço afastado a vários metros do ponto de injeção. Os micróbios nativos foram estimulados com sucesso e a precipitação de calcite parece estar a progredir. A taxa de precipitação é mais lenta do que na aplicação de bioadição descrita acima (Dejong et al., 2013).

### Formação de biofilme

Segundo DeJong *et al.* (2013), os biofilmes formam-se quando os microrganismos aderem a uma superfície e segregam substâncias poliméricas extracelulares (SPE) como parte do seu metabolismo. Esta SPE "viscosa" favorece a aderência de mais microrganismos e outras partículas, formando assim um biofilme que pode influenciar as propriedades físicas dos solos, como mostra a Figura 2.5. Perto da superfície em ambientes marinhos e ribeirinhos, os biofilmes desempenham um papel importante na captura e estabilização de sedimentos, aumentando a resistência à erosão. No subsolo, o crescimento de biofilmes pode reduzir a condutividade hidráulica, um processo conhecido como biocolmatação. Grande parte da investigação sobre biocolmatação está focada na prevenção e/ou remoção do material de obstrução, por exemplo por lavagem com formaldeído, para restaurar ou manter a funcionalidade de poços ou drenos. No entanto, alguns investigadores descobriram que a formação de biofilmes no solo também pode ser vantajosa, por exemplo para limitar as perdas de água dos campos de arroz. DeJong *et al.* (2013) referem que foram feitas tentativas para usar a biocolmatação para diminuir a condutividade hidráulica sob e através de barragens e diques, para reduzir a infiltração em lagoas, para reduzir fugas em aterros sanitários, para encapsular camadas de solo contendo óleo e controlar a migração de águas subterrâneas com barreiras subsuperficiais.

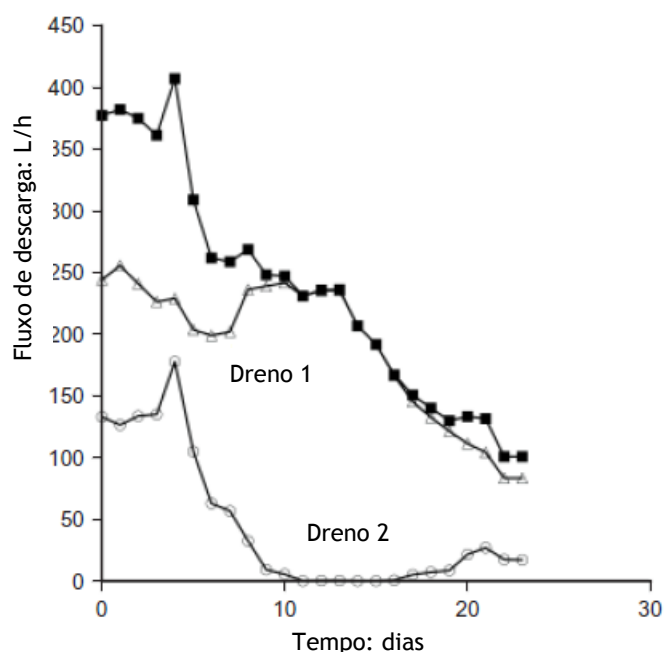


Figura 2.5 - Resultado do tratamento com biofilme para a redução da permeabilidade: dados de campo que mostram a redução da percolação numa barragem após tratamento com biofilme para a redução da condutividade hidráulica (adaptado de DeJong *et al.*, 2013)

### Geração de gás

A atividade biológica subsuperficial é frequentemente acompanhada pelo desenvolvimento de bolhas de gás em solos saturados. Uma variedade de gases pode ser produzida por processos microbianos (por exemplo, dióxido de carbono, hidrogénio, metano e nitrogénio), com o organismo e o ambiente oxidativo/reduutivo do fluido nos poros a influenciarem os produtos finais da reação. Por exemplo, micróbios aeróbios usam o oxigénio como ativador de eletrões durante o processo de respiração microbiana. Tipicamente, uma molécula orgânica é usada como fonte de carbono e energia, e os produtos resultantes da reação incluem água e dióxido de carbono. Em contraste, a respiração anaeróbica por *erchea* metanogénicas ocorre na ausência de oxigénio e resulta na produção de metano e por vezes dióxido de carbono (ou seja, parte do carbono é oxidado em dióxido de carbono e a outra parte é reduzida a metano). O processo utiliza parte do carbono, em oposição ao oxigénio, como ativador de eletrões. A desnitrificação respiratória ocorre através da redução de nitrato, produzindo nitrogénio e gás dióxido de carbono como os produtos finais da reação em ambientes com altos índices de nitrato em relação ao carbono (Dejong et al., 2013).

Segundo DeJong *et al.* (2013), a presença de bolhas de gás dentro de um solo saturado resulta em uma diminuição da velocidade da onda P medida em ensaios na mesa vibratória; esta diminuição é transitória em solos grosseiros, mas não em solos finos que podem destruir as bolhas de gás geradas. A Figura 2.6 mostra a variação da velocidade das ondas P numa areia inicialmente saturada e após a geração de nitrogénio, devido ao processo de desnitrificação. A redução da velocidade das ondas P indica uma redução do grau de saturação da areia, devido ao gás.

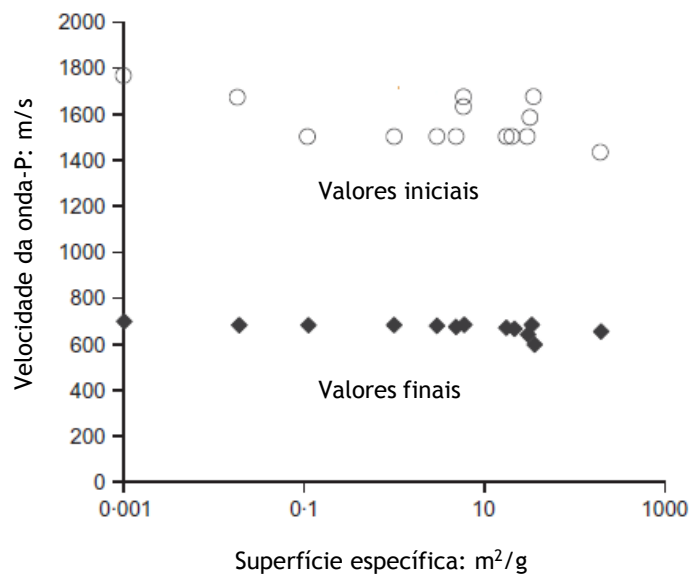


Figura 2.6 - Redução da velocidade das ondas P devido à geração de gás de uma areia inicialmente saturada, considerando diferentes superfícies específicas (adaptado de Dejong et al., 2013)

### Geração de biopolímeros

Segundo DeJong *et al.* (2013), têm sido exploradas aplicações (*in situ* e em laboratório) de biopolímeros para o melhoramento dos solos. Os biopolímeros misturados com os solos têm mostrado a redução da condutividade hidráulica e o aumento de resistência ao corte. Por exemplo, misturando silte com 0,3% (em peso) de goma xantana, um biopolímero comercialmente disponível, pode reduzir a condutividade hidráulica saturada em duas ordens de grandeza (até  $10^{-6}$  cm/s) e aumentar a resistência ao corte drenado até 30%.

Foram referidos decréscimos da permeabilidade em menos de duas semanas numa areia tratada com uma calda de biopolímero. Foi ainda referido o aumento da resistência ao corte devido à geração de biopolímeros no solo *in situ*. No entanto, a maioria das investigações de aplicações de crescimento de biopolímeros *in situ* e geração de SPE concentrou-se na redução da condutividade hidráulica para formar barreiras hidráulicas.

## 2.3 Efeitos nas propriedades dos solos

Os processos geoquímicos biomediados têm o poder de modificar as propriedades físicas dos solos (densidade, granulometria, porosidade, saturação), as propriedades de condução (hidráulicas, elétricas, térmicas), as propriedades mecânicas (rigidez, dilatância, compressibilidade, expansão/retração, coesão, cimentação, ângulo de atrito, erodibilidade e curva de retenção de água no solo) e, a composição química dos solos (buffering, reatividade, capacidade de troca catiónica). Nos parágrafos seguintes, isto será pode ser conceptualizado, considerando como é que os diferentes processos biogeoquímicos podem influenciar um conjunto de grãos de areia e/ou uma agregação de partículas de argila (Dejong *et al.*, 2013).

Os processos de biomineralização precipitam sólidos inorgânicos no solo (incluindo a precipitação de calcite induzida microbiologicamente) podem claramente ter um efeito mecânico: por exemplo, redução do índice de vazios, cimentação frágil nos contatos entre partículas, aumento de finos nos poros dos solos e maior rigidez. Estes efeitos, provavelmente, resultarão numa redução da condutividade hidráulica, aumento da rigidez para pequenas deformações, aumento da resistência para grandes deformações e aumento dilatante (Dejong *et al.*, 2013).

A formação de biofilme e a produção de outras substâncias poliméricas extracelulares (SPE) são processos biogeoquímicos adicionais que podem afetar o comportamento dos solos. Estes processos geram sólidos orgânicos que ocupam parte dos poros do solo com um material mole, dúctil e elastomérico que reduz o tamanho dos poros, reduz o rearranjo das partículas durante a deformação do solo e aumenta a ductilidade. Estas alterações podem reduzir a condutividade hidráulica e, talvez, reduzir o amolecimento rápido durante o corte não drenado. No entanto,

a modificação das propriedades devido à produção de biofilme e SPE podem ser perdidas e, portanto, aplicáveis somente para tratamentos temporários, uma vez que estes sistemas vivos devem ser continuamente nutridos ou o seu desempenho pode tornar-se pouco confiável (Dejong et al., 2013).

A geração de biogás a partir da desnitrificação ou de outros processos biogeoquímicos pode permitir a redução a longo prazo do grau de saturação de um solo. A redução do grau de saturação aumenta a compressibilidade dos poros e pode reduzir o excesso de pressão na água dos poros gerado durante o carregamento cíclico, mitigando o potencial de liquefação induzido por terremotos em alguns solos (Dejong et al., 2013).

Outros processos que foram identificados, mas atualmente estão menos desenvolvidos, incluem o crescimento de algas e fungos para estabilização do solo superficial, bactérias e vermes para a oxidação do metano, biopolímeros para aplicações de perfuração, caldas orgânicas para controle hidráulico e precipitação de silicatos (Dejong et al., 2013).

Segundo DeJong *et al.* (2013), as formigas são eficazes na granulometria do solo, na densificação e na criação de linhas de fluxo preferenciais (macroporos); elas também se adaptam e otimizam os seus esforços considerando as forças de capilaridade nos contatos entre partículas. Da mesma forma, a excreção mucosa das minhocas pode reforçar o solo ao longo das passagens de tal modo que o aumento de resistência pode ser medido por meio do ensaio CPT.

De acordo com Mendonça e Cardoso (1998), as raízes penetram nos maciços acarretando quer um efeito desfavorável, que consiste na abertura de fissuras que incrementam a infiltração da água, quer um efeito favorável, dado que absorvem a humidade e, conseqüentemente, conduzem à diminuição do teor em água dos maciços terrosos. Do ponto de vista mecânico, os efeitos das raízes são genericamente benéficos, consistindo em:

- a) união superficial das partículas, resultando em restrição dos movimentos, redução da erosão e, naturalmente, incremento da resistência ao corte;
- b) penetração nos níveis profundos dos maciços, conduzindo à amarração dos níveis superiores aos inferiores e ao suporte dos níveis superiores através de reforço e efeito de arco.

Os estudos têm mostrado um acréscimo na resistência diretamente proporcional à densidade das raízes. Foi ainda referido que, nos casos de amostras de solo contendo raízes, a resistência de pico e a resistência residual aumentaram, respetivamente, 2 e 4 vezes (Mendonça & Cardoso, 1998).

Mendonça e Cardoso (1998) adotaram um modelo conceptual com o objetivo de desenvolver metodologias de quantificação do efeito do reforço de raízes. A seguir, é feita uma descrição detalhada do desenvolvimento do método.

### Resistência ao corte do sistema solo-raízes

O texto que se segue foi adaptado de Mendonça e Cardoso (1998). Para calcular a resistência ao corte dos solos,  $\tau_s$ , costuma-se usar o critério de rotura de Mohr-Coulomb (Equação 2.2):

$$\tau_s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad 2.2$$

onde  $\sigma'$  é a tensão normal efetiva,  $\phi'$  é o ângulo de atrito e  $c'$  é a coesão.

Quando o solo contém raízes, a rotura envolve a rotura do sistema solo-raízes. Uma aproximação simplificada consiste em considerar as raízes como reforço que incrementam a resistência ao corte de um certo valor,  $\tau_R$ . Então a resistência ao corte total,  $\tau$ , vem (Equação 2.3):

$$\tau = \tau_s + \tau_R \quad 2.3$$

É geralmente aceite que, globalmente, o efeito dos reforços no comportamento mecânico dos solos que os envolve se traduz por um incremento da tensão de confinamento, resultante das restrições da deformação introduzidas pelos esforços, genericamente menos deformáveis do que o solo não reforçado. Este efeito mobiliza uma resistência ao corte adicional, para além da que se desenvolve apenas devido à tensão de confinamento externa aplicada.

A resistência ao corte adicional devida à presença das raízes depende naturalmente das propriedades do sistema solo-raízes (fibras). Entre essas propriedades são de referir as dimensões, a resistência à tração e a rigidez das fibras e as características friccionais das interfaces solo-fibras.

Para avaliar a contribuição da resistência ao corte das raízes,  $\tau_R$ , é, portanto, necessário considerar a interação solo-raízes. Seguindo as hipóteses dos métodos de equilíbrio limite, a deformação de corte ao longo da superfície de rotura é supostamente concentrada numa zona restrita com espessura  $z$  (Figura 2.7). Uma raiz é representada por uma barra, inicialmente retilínea (linha a tracejado), que é deslocada para a posição representada a traço contínuo. O deslocamento introduz na barra uma força axial, bem como um esforço transversal e um momento fletor. Para um dado deslocamento tangencial,  $x$ , a deformação da barra,  $\theta$ , a força axial, o esforço cortante e o momento dependem da rigidez da barra relativamente à do solo e do comprimento da barra.



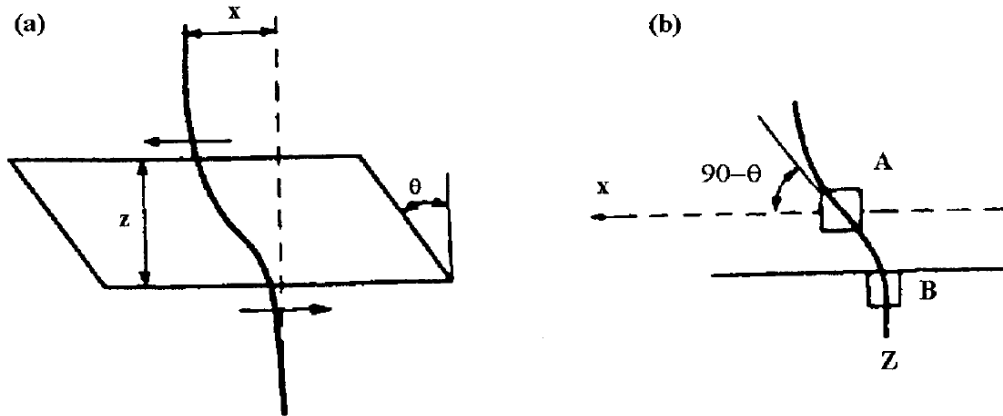


Figura 2.7 -Deslocamento de uma raiz: a) zona de corte; b) pormenor (Mendonça e Cardoso, 1998)

O modelo de interação mais simples consiste em assumir que o solo se deforma em corte puro e as raízes em conjunto com ele (Figura 2.8), o que é válido para raízes perfeitamente flexíveis. Neste caso, o ângulo  $\theta$ , que define a direção de uma raiz na banda de corte, é dado pela expressão 2.4:

$$\tan \theta = \tan \rho + \tan \beta \Rightarrow \theta = \tan^{-1} (x/z + \tan \beta) \quad 2.4$$

em que os símbolos têm o significado explicitado na Figura 2.8.

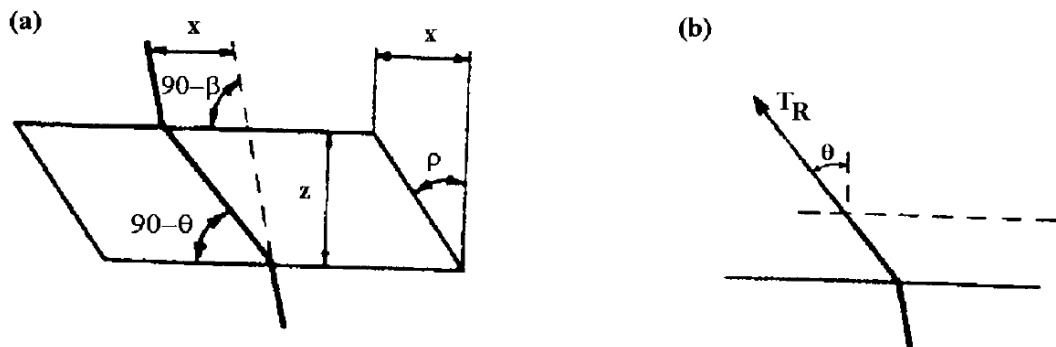


Figura 2.8 -Modelo de interação solo-raiz para uma raiz flexível: a) zona de corte; b) força na raiz (Mendonça & Cardoso, 1998)

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

A força de tração que se instala nessa raiz,  $T_R$ , decompõe-se numa componente normal e numa componente tangencial à superfície de corte. A primeira aumenta a tensão de confinamento e, por conseguinte, a resistência friccional ao longo do plano de corte. A segunda contribui diretamente para a resistência ao corte. Sendo  $A_S$  a área de influência da raiz em consideração, o acréscimo de resistência ao corte que ela introduz no sistema solo-raiz é dado por (Equação 2.5):

$$\tau_R = (\cos \theta \tan \phi' + \sin \theta) T_R / A_S \quad 2.5$$

em que  $\phi'$  representa o ângulo de atrito do solo, o qual se supõe permanecer inalterado pela presença de raízes.

Naturalmente, no caso de existirem  $n$  raízes, o acréscimo de resistência ao corte é definido pela expressão 2.6:

$$\tau_R = \left[ \sum_{i=1}^n (\cos \theta_i \tan \phi' + \sin \theta_i) T_{Ri} \right] / A_S \quad 2.6$$

sendo  $\theta_i$  e  $T_{Ri}$  a inclinação em relação à normal à superfície de deslizamento e a força de tração na raiz genérica  $i = 1, n$ , respetivamente, e  $A_S$  a área de influência das  $n$  raízes.

Em princípio, as raízes podem romper através de dois mecanismos: por falta de resistência à tração ou por falta de aderência. Portanto, a força de tração que se pode instalar numa raiz,  $T_{Ri}$ :

- a) é limitada pela sua resistência à tração, ou seja (Equação 2.7):

$$T_{Ri} \leq \sigma_R A_{Ri} \quad 2.7$$

onde  $\sigma_R$  é a resistência à tração das raízes e  $A_{Ri}$  é a sua secção;

- b) não pode exceder a resistência da interface solo-raiz, pelo que (Equação 2.8):

$$T_{Ri} \leq \tau_a p_{Ri} L_{ai} \quad 2.8$$

onde  $\tau_a$  é a resistência das interfaces,  $p_{ri}$  é o perímetro médio da raiz e  $L_{ai}$  é o seu comprimento de amarração.

Modelo conceptual

Uma vez que a completa caracterização geométrica e mecânica de um sistema de raízes é muito difícil, senão impossível, não se justifica a adoção de modelos muito elaborados para a avaliação da sua contribuição para a resistência ao corte global do conjunto solo-raízes (Mendonça & Cardoso, 1998). Optaram, por isso, por um modelo simples, de fácil aplicação, adaptado às possibilidades de caracterização das raízes.

A primeira hipótese simplificadora assumida consiste em admitir que a rotura ocorre por tração das raízes, ou seja, supõe-se que a sua resistência à tração é totalmente mobilizada. Para que este pressuposto seja válido, o arranque não se deve produzir. Para tal é necessário que as raízes possuam, em combinação, um comprimento atrás da zona de rotura e uma rugosidade suficientes para que a aderência seja superior à sua resistência à tração (Mendonça & Cardoso, 1998).

Tendo presente as Equações 2.7 e 2.8, o comprimento mínimo,  $L_{aiMin}$ , das raízes requerido para prevenir o arranque é dado pela expressão seguinte:

$$L_{ai} \geq L_{aiMin} = \sigma_R A_{Ri} / \tau_a p_{Ri} \quad 2.9$$

onde os símbolos têm o significado anteriormente referido.

Por outro lado, aceita-se que o ângulo  $\beta$  (Figura 2.8), que define a inclinação das raízes antes de se iniciar o corte, é o mesmo para todas elas. Nestas condições a Equação 2.6 transforma-se na Equação 2.10:

$$\tau_R = (\cos \theta \tan \phi' + \text{sen } \theta) \left( \sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / A_S = (\cos \theta \tan \phi' + \text{sen } \theta) t_R \quad 2.10$$

Por sua vez,  $t_R$  pode escrever-se do seguinte modo (Equação 2.11):

$$t_R = \left( \sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / A_S = \sigma_R \left( \sum_{i=1}^n A_{Ri} \right) / A_S \quad 2.11$$

ou seja,  $t_R$  é igual ao produto da resistência à tração das raízes,  $\sigma_R$ , pela densidade de raízes.

A densidade das raízes pode ser definida por (Equação 2.12):

$$\left( \sum_{i=1}^n A_{Ri} \right) / A_S = N_f A_{Rm} \quad 2.12$$

onde  $N_f$  é o número médio de raízes por unidade de área e  $A_{Rm}$  é o valor médio das secções transversais das raízes.

Introduzindo a Equação 2.12 em 2.11 e, depois, esta na Equação 2.10 obtém-se a Equação 2.13:

$$\tau_R = N_f A_{Rm} \sigma_R (\cos \theta \tan \phi' + \text{sen } \theta) \quad 2.13$$

Na Equação 2.13 a única grandeza desconhecida é o ângulo que define a direcção das raízes na banda de corte,  $\theta$ , o qual varia com a espessura da zona de corte,  $z$ , e com o valor do deslocamento de corte,  $x$  (Figuras 2.7 e 2.8).

Considerando para o ângulo de atrito uma gama de variação que inclui os valores comuns dessa grandeza, isto é,  $25^\circ \leq \phi' \leq 40^\circ$ , conclui-se que o termo entre parênteses da Equação 2.12 é pouco sensível ao valor de  $\theta$ . Com efeito, para qualquer valor do ângulo de atrito pertencente à gama indicada, esse termo varia apenas 3 e 6% quando se considera  $45^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ . Para os intervalos de variação indicados, o termo em causa toma valores entre um mínimo e um máximo, respetivamente, iguais a 1,04 ( $\phi' = 25^\circ$  e  $\theta = 40^\circ$ ) e a 1,31 ( $\phi' = 40^\circ$  e  $\theta = 50^\circ$ ), pelo que, em termos médios, se pode considerar, simplificadamente (Equação 2.14):

$$\tau_R = 1,15 N_f A_{Rm} \sigma_R \quad 2.14$$

Esta é, portanto, a expressão que, com as hipóteses assumidas, traduz a contribuição das raízes para a resistência ao corte do sistema solo-raízes. Mendonça e Cardoso (1998) referem que têm sido desenvolvidos modelos mais refinados, porém, o modelo proposto permite a obtenção de uma boa aproximação do valor do reforço do solo para a maioria das situações.

## 2.4 Biocompósitos

O desenvolvimento sustentável visa atenuar problemas ambientais, garantindo o equilíbrio entre o desenvolvimento económico e a preservação do meio ambiente. Os biocompósitos resultam da combinação de materiais naturais com polímeros, e constituem uma nova classe de materiais, ambientalmente mais favoráveis, que têm custos de energia e poluição reduzidos durante a sua produção, bem como um maior potencial de reutilizações.

De acordo com Haase e Schanz (2015), a investigação sobre compósitos argila-polímero desenvolveu-se significativamente nos últimos anos. Os vários campos da investigação (ciência de polímeros e de coloides, agricultura e, mais recentemente, a engenharia geotécnica e geoambiental) demonstraram várias propriedades benéficas dos compósitos, como são exemplo, o melhoramento da resistência e a estabilidade contra a erosão dos solos e o melhoramento do efeito de barreira.

Segundo Haase e Schanz (2015), as atividades de investigação em engenharia geotécnica e geoambiental têm mostrado várias melhorias nas propriedades do solo devido à formação de compósitos argila-polímero. Um dos estudos mais promissores focou-se na modificação da bentonite a fim de estabilizar a sua capacidade selante mesmo quando permeada por eletrólitos quimicamente agressivos. Referiam ainda que uma melhoria do efeito de barreira de bentonite foi originada por polímeros aniônicos. As razões pelas quais os compósitos argila-polímero melhoram o comportamento dos solos ainda não estão completamente entendidos, fundamentalmente em termos de mecanismos que determinam o seu desempenho macroscópico.

A investigação em ciência de coloides descobriu várias relações entre as características constitutivas da argila e do polímero, nomeadamente, a mineralogia da argila, a carga iónica e a massa molecular do polímero e a sua influência na formação do compósito, ou seja, a adsorção do polímero em superfícies de argila, bem como a microestrutura resultante, ou seja, associações de partículas de argila. Os autores realçam o facto destas descobertas sobre as características de microescala dos compósitos raramente terem sido transferidas para a área da engenharia geotécnica, a fim de explicar o comportamento macroscópico dos compósitos (Haase & Schanz, 2015).

Haase e Schanz (2015) utilizaram compósitos de bentonite e polímero com características constitutivas sistematicamente variadas, e estudaram o comportamento hidromecânico macroscópico acoplado às suas características estruturais microscópicas e de formação do compósito. Nesse estudo, a formação dos compósitos foi observada em suspensões aquosas, uma vez que esta condição é relevante para a engenharia geotécnica e geoambiental. A interação superficial entre argilas e polímeros é dominada pelas suas propriedades eletrostáticas. Por esta razão, a formação de compósitos depende fortemente das características de carga iónica dos polímeros e das argilas, isto é, a mineralogia (Haase & Schanz, 2015). Referiram ainda que foram identificados e caracterizados fatores adicionais em estudos anteriores, como a granulometria da argila, a massa molecular do polímero, a qual explica a relevância dos efeitos de entropia nos processos de adsorção, a geometria do polímero e as condições ambientais durante a formação. Para além da interação argila-polímero, as características de carga dos polímeros também determinam a conformação do polímero. Enquanto a repulsão intramolecular de cargas iónicas idênticas leva a geometrias esticadas para polímeros catiónicos e aniônicos, os polímeros não iónicos podem ser descritos como

"aleatoriamente enrolados". Em suma, a formação de biocompósitos pode ser caracterizada por diversos fatores, nomeadamente a quantidade de polímero adsorvido pela argila, o tipo de mecanismos de ligação entre a argila e o polímero, e a conformação dos polímeros nas superfícies da argila.

## 2.5 Discussão e Conclusão

A valorização dos processos biológicos que ocorrem naturalmente nos solos encontra-se ainda em desenvolvimento e com interesses no domínio da geotecnia contemporânea. Nas secções anteriores foi feita uma síntese do estado do conhecimento sobre os aspetos mais relevantes dos principais processos biológicos em Geotecnia.

Entre os processos biológicos apresentados, o que tem merecido alguma consideração em fase de projeto é o estabelecimento de vegetação, particularmente do sistema de raízes, havendo já modelos que permitem avaliar a estabilidade de taludes revestidos com vegetação como é exemplo o modelo adotado por Mendonça e Cardoso (1998) para a avaliação da resistência ao corte do conjunto global solo-raízes.

As raízes de plantas podem promover a densificação do solo ou o aumento da sua permeabilidade, os insetos e invertebrados podem provocar o aumento da percolação nos maciços, e a atividade biológica pode melhorar a resistência e rigidez do solo.

O estado atual do conhecimento sobre o comportamento dos solos contendo biopolímero é muito limitado e devido à sua considerável capacidade de retenção de água é indispensável a análise com mais detalhe do efeito da presença de sólidos orgânicos, especificamente, na resistência ao corte e na permeabilidade do solo, em condições saturadas.

## **Capítulo 3 - Programa Experimental**





## Capítulo 3 - Programa Experimental

### 3.1 Introdução

O efeito da atividade biológica sobre o comportamento de um solo argiloso tem interesse em algumas situações geotécnicas que envolvam problemas de estabilidade de taludes, tais como taludes naturais, diques e barragens de rejeitados. Dada a sua relevância, foram considerados diferentes métodos experimentais para a caracterização laboratorial do comportamento do material em condições saturadas. O estudo baseou-se principalmente em ensaios Fall Cone, Vane Test e edométricos de permeabilidade.

Neste capítulo é feita a apresentação dos equipamentos e materiais utilizados, prosseguindo com a descrição dos procedimentos de ensaio elaborados de modo a obter-se a variação da resistência ao corte não drenado e da condutividade hidráulica em função da concentração de biopolímero no solo, para teores em água dentro dos limites do seu estado de consistência plástico.

### 3.2 Variáveis experimentais

#### 3.2.1 Variáveis independentes e fixas

A variável independente considerada no presente estudo, isto é, a variável que vai ser manipulada e controlada é o teor em biopolímero. O teor em biopolímero ( $\epsilon$ ) é definido pela razão entre a massa de biopolímero e a massa de solo seco, expresso em percentagem. Este descritor é avaliado numa escala específica, assumindo diferentes níveis de acordo com o indicado na Tabela 3.1. Conceptualmente, o teor em biopolímero de 0% referencia a situação para a qual se assume, correntemente que não há evolução das propriedades do solo devido à atividade biológica. Com o teor de 0,05% pretende-se observar os efeitos do restabelecimento natural da atividade biológica, tendo por base as concentrações de EPS nos solos em pousio, as quais são inferiores a 500  $\mu\text{g/g}$  de solo (Redmile-Gordon, Brookes, Evershed, Goulding, & Hirsch, 2014). Com o teor de 0,1% perspetivam-se os efeitos de uma intervenção geotécnica no comportamento do solo.

As variáveis fixas são o tipo de solo (SC - areia argilosa), o tipo de biopolímero (gelano), a temperatura (T) e o grau de saturação do solo ( $S_r$ ) quando o teor em água ( $\omega$ ) toma valores no intervalo de plasticidade do solo.

Tabela 3.1 - Plano de associação entre as variáveis experimentais

Série de ensaios	Variáveis fixas					Variável independente	Variáveis dependentes	
	tipo de solo	tipo de biopolímero	T (°C)	S <sub>r</sub> (%)	ω (%)	ε (%)	c <sub>u</sub> (kPa)	k* (m/s)
Série 1 (de controlo)	SC	gelano	20 +/- 2	100	22	0	x	x
Série 2	SC	gelano	20 +/- 2	100	22	0,05	x	x
Série 3	SC	gelano	20 +/- 2	100	22	0,1	x	x

\*i = 10 m/m

### 3.2.2 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, ou de resposta, sofrem alteração devido à variável independente. Na situação em estudo, as variáveis a determinar em função do teor em biopolímero são a resistência ao corte não drenado (c<sub>u</sub>) e a permeabilidade (k), as quais dependem dos instrumentos de medida utilizados (ver 3.2.3 e 3.4). A Tabela 3.1 mostra as associações entre a variável independente e as variáveis dependentes, cujas relações interessa analisar.

### 3.2.3 Descrição dos equipamentos

Para analisar o efeito causado pelo teor em biopolímero na resistência ao corte não drenado e na permeabilidade do solo foram realizados ensaios laboratoriais, utilizando os seguintes equipamentos disponíveis no Laboratório de Mecânica dos Solos da UBI: *Fall Cone*, *Vane* e Edómetro de permeabilidade. A seguir, e de um modo sucinto, encontra-se a descrição destes equipamentos, indicando as suas características principais.

- **Aparelho do *Fall Cone***

O *Fall Cone* ou Cone Penetrómetro pode ser utilizado para avaliar a resistência ao corte não drenado do solo em estudo. O aparelho consiste em três componentes essenciais: o recipiente das amostras, o cone e o sistema de controlo e medição da penetração do cone, como ilustra a Figura 3.1. O recipiente das amostras é feito de aço inoxidável, com forma cilíndrica, tendo 55 mm de diâmetro interno e 53 mm de profundidade. O cone é revestido de aço inoxidável, faz um ângulo de 30° no vértice e possui 35 mm de altura e 80 g de massa (incluindo a massa da haste do cone). O aparelho tem um mecanismo que permite ajustar manualmente a ponta do cone à superfície da amostra, e pode ser acionado automaticamente para soltar e prender o cone de modo instantâneo, facilitando o controlo do tempo em queda livre, pré-programado para 5 s. O aparelho está equipado com um sistema de medição da penetração do cone, cuja resolução é de 0,01 mm.



Figura 3.1 - Aparelho do Cone Penetrômetro automatizado

- **Aparelho do Vane**

O *Vane* ou Molinete é particularmente apropriado para a estimativa da resistência ao corte não drenado de solos argilosos brandos. O aparelho consiste em três componentes essenciais: o recipiente das amostras, o molinete e o sistema de medição da rotação do molinete, como ilustra a Figura 3.2. O molde das amostras é de aço inoxidável, com forma cilíndrica, tendo 101,5 mm de diâmetro interno e 87 mm de profundidade, suficiente para se proceder a sete medições em cada amostra com uma folga de pelo menos dois diâmetros do molinete entre pontos de medição e entre cada superfície de corte e os bordos exteriores da amostra. Ante a consistência do solo, foi selecionado um molinete, isto é, um conjunto de quatro pás retangulares rigidamente soldadas a uma haste central, que apresenta as seguintes medidas: 12,7mm de diâmetro, uma relação diâmetro:altura de 1:2, 3 mm de diâmetro da haste e 0,5 mm de espessura das pás.

O aparelho tem um mecanismo que permite impor uma velocidade de rotação constante ao molinete, pré-programada para 6°/min. Porém, pode-se aplicar manualmente a velocidade de rotação pretendida. A rotação é imposta através de uma mola. O aparelho está equipado com uma escala graduada, cuja resolução é de 1°, para observar a deflexão angular da mola causada pela rotação do molinete.



Figura 3.2 - Aparelho do Vane após a realização do ensaio

- **Edômetro de permeabilidade**

O edômetro de permeabilidade (Figura 3.3) é composto por quatro componentes essenciais: a célula edométrica, o sistema de aplicação de cargas, o sistema de medição da deformação vertical da amostra e o sistema de aplicação da carga hidráulica constante. A célula edométrica utilizada está esquematizada na Figura 3.4, a qual permite solicitar as amostras de acordo com as hipóteses base da Teoria de Consolidação Unidimensional de Terzaghi. O anel que contém as amostras é feito de aço inoxidável, tendo 50 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura. O carregamento é transmitido ao topo das amostras por meio de um sistema de pesos e viga de equilíbrio, cuja relação de carga é de 1:10. O edômetro está equipado com um sistema automático de aquisição de dados, facilitando a medição da deformação vertical da amostra por meio de um LVDT, cuja resolução é de 0,01 mm. A carga hidráulica constante foi aplicada por meio de uma garrafa de Mariotte ligada ao canal de drenagem inferior da célula. Isto significa que a fase fluida apenas pode sair através da superfície superior da amostra (a amostra tem apenas uma fronteira drenante).



Figura 3.3 - Vista geral do edômetro de permeabilidade durante a realização do ensaio

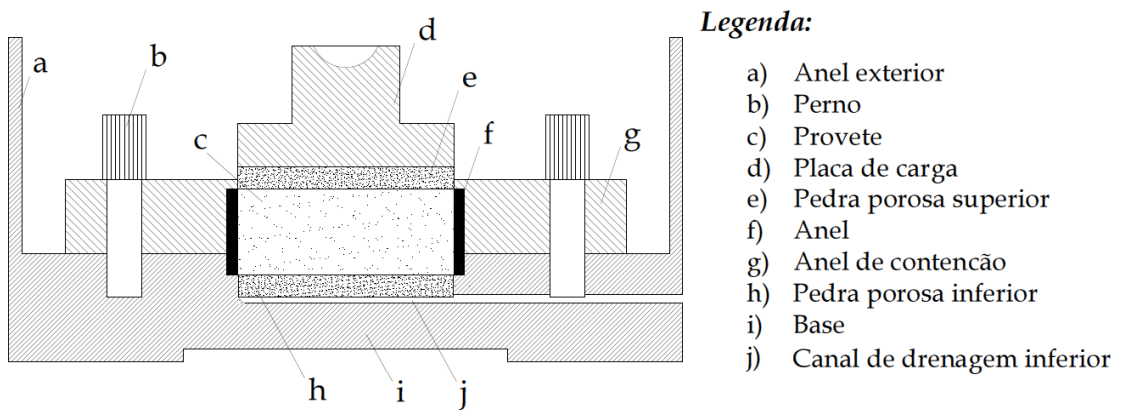


Figura 3.4 - Corte esquemático da célula edométrica

### 3.3 Caracterização dos materiais

#### 3.3.1 Areia argilosa

O solo selecionado para o estudo laboratorial é uma areia com finos, obtido em laboratório a partir da mistura de dois solos: uma areia natural e uma caulinite comercial. No Anexo 1 é apresentada a caracterização do solo, classificado por Areia argilosa (SC) de acordo com o sistema de classificação unificada de solos (ASTM D 2487, 1985). A Tabela 3.2 reúne os valores das principais características do solo. A Figura 3.5 apresenta a curva granulométrica do solo. Foi ainda feita a identificação mineralógica das amostras de areia e de caulinite, por difração de raios X. A Figura 3.6 mostra o Difrátmetro de Raios X e a Tabela 3.3 sintetiza os resultados das análises realizadas: a concentração dos elementos inorgânicos majoritários (Al, Ca, Mg, Na, K, Fe, Si e P) presentes nas duas frações da areia argilosa e o teor dos elementos majoritários sob forma de óxidos. Para a comparação da constituição, apresentam-se os resultados normalizados para 100%. A análise indica que as partículas de areia são essencialmente constituídas por quartzo, enquanto que a caulinite é constituída por alumino-silicatos com uma concentração de potássio ligeiramente superior ao que é normal.

Tabela 3.2 - Características do solo

Parâmetro	solo SC
% passados # 0,074 mm (%)	30
Diâmetro efetivo, $D_{10}$ (mm)	0,002
Diâmetro mediano, $D_{50}$ (mm)	0,35
Limite de liquidez, $\omega_L$ (%)	22
Índice de plasticidade, $I_p$ (%)	9
Densidade das partículas sólidas, $G_s$ (-)	2,648

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

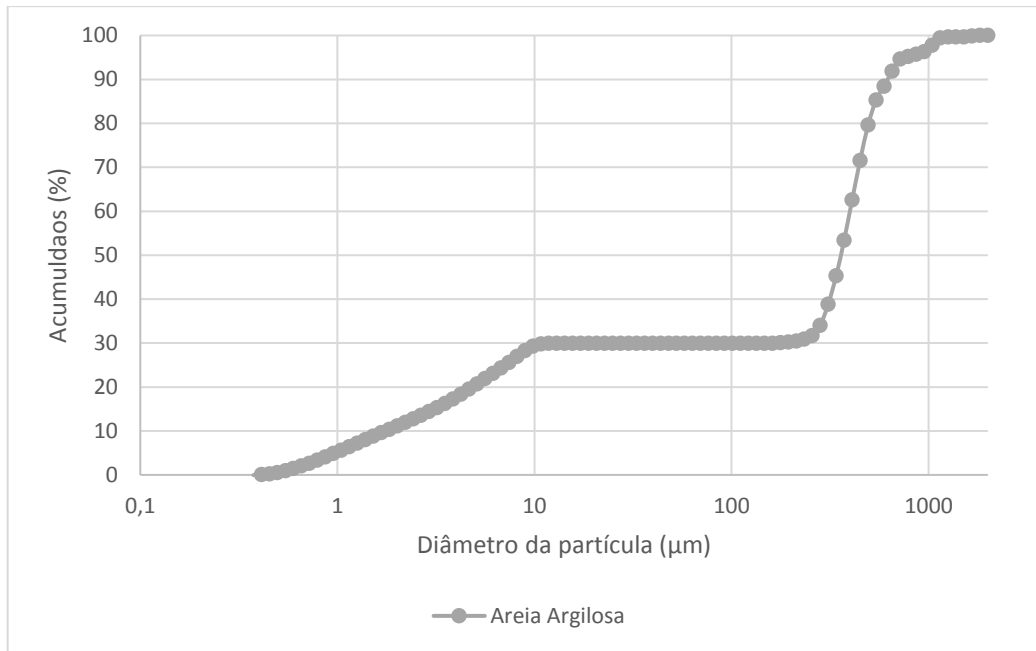


Figura 3.5 - Curva granulométrica da areia argilosa



Figura 3.6 - Vista geral do Difratômetro de Raios X da UBI

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela 3.3 - Análise mineralógica dos componentes da areia argilosa

Elementos e compostos	areia	caulinite
Oxigênio, O	51,45	49,12
Sódio, Na	0,45	-
Alumínio, Al	2,08	21,94
Silício, Si	42,34	24,91
Potássio, K	1,44	2,39
Cálcio, Ca	1,96	-
Ferro, Fe	0,28	0,75
Magnésio, Mg	-	0,44
Níquel, Ni	-	0,45
Na <sub>2</sub> O	0,60	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95	35,40
SiO <sub>2</sub>	91,05	45,51
K <sub>2</sub> O	1,75	2,46
CaO	2,75	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,92
MgO	-	0,63
NiO	-	0,49

### 3.3.2 Biopolímero

O biopolímero selecionado para o estudo laboratorial é um exopolissacárido sintetizado pela estirpe industrial *Sphingomonas elodea*, conhecido por goma de gelano KELCOGEL, cujas principais propriedades são apresentadas na Tabela 3.4. Na sua forma nativa, o gelano é sintetizado e excretado para o meio circundante sob a forma de muco. Assim, optou-se por preparar um gel de gelano, a adicionar ao solo em concentrações de acordo com o indicado na Tabela 3.1, o qual se apresentava translúcido.

Tabela 3.4 - Características do biopolímero

Propriedade	gelano
% passados # 0,355 mm (%)	98
pH da solução (1% de gelano em água destilada)	4,5 - 6,5



## 3.4 Procedimentos experimentais

### 3.4.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas com um teor em água idêntico ao limite de liquidez do solo (22%). A amostra de controlo foi preparada começando por misturar a argila com a água destilada e terminando com a incorporação da areia nessa mistura. Para as amostras de solo contendo biopolímero, começou-se por misturar a argila com parte da água destilada, prosseguiu-se com a introdução do gel de gelano nessa mistura e por fim fez-se a incorporação da areia. A mistura foi realizada no recipiente do misturador, a uma velocidade de dispersão de 400 rpm. O tempo total de mistura foi de 10 minutos, aproximadamente. As amostras foram guardadas em caixas fechadas, ao abrigo da luz e do calor.

### 3.4.2 Caracterização da estrutura do material (MEV)

Para observar as amostras, de modo a identificar possíveis alterações na estrutura do solo provocadas pelo gelano, recorreu-se à microscopia eletrónica de varrimento (MEV), por meio do Microscópio Eletrónico de Varrimento da UBI, VP SEM Hitachi S - 3400N (Figura 3.6). Este aparelho emite um feixe de eletrões de alta energia para gerar uma variedade de sinais na superfície de uma amostra sólida. Esses sinais revelam informações sobre a amostra, nomeadamente sobre a morfologia externa (textura) e a sua composição química. No modo de observação em pressão variável, permitiu o estudo das amostras húmidas sem tratamento, assim como o estudo das amostras secas com revestimento.

Uma pequena quantidade de amostra húmida foi colocada no porta amostras (com 5 mm de diâmetro e 1 mm de altura), e posteriormente arrefecida por efeito de Peltier a  $-25^{\circ}\text{C}$ . Durante a análise houve o cuidado de conservar a humidade da amostra mediante o ajuste da pressão à temperatura. Para as amostras previamente secas em estufa, começou-se por preparar e fixar no suporte uma lasca de solo seco e, em seguida, procedeu-se ao seu revestimento com ouro normal. Os dados foram colhidos em áreas selecionadas da superfície da amostra, gerando imagens que exibem variações espaciais das propriedades da amostra. Uma vez que a análise MEV é não destrutiva, foi possível analisar os mesmos materiais repetidamente.



Figura 3.7 - VP SEM Hitachi S - 3400N

### 3.4.3 Ensaio *Fall Cone* ou Cone Penetrômetro

Os ensaios foram realizados no aparelho de Fall Cone, descrito em 3.2.3. A metodologia adotada, de acordo com o procedimento recomendado na ISO/TS 17892-6:2004, consistiu em submeter as amostras a uma deformação em condições não drenadas e observar a evolução da penetração do cone, cuja descrição detalhada é feita a seguir.

Foram moldadas três amostras para cada série de ensaios, colocando o solo no recipiente de modo a constituir um material homogêneo sem bolhas de ar, e de seguida procedeu-se ao ensaio, observando a penetração do cone em intervalos de tempo regulares de 1 s, até serem atingidos os 5 s. O tempo de armazenamento e manuseamento das amostras foi idêntico.

### 3.4.4 Ensaio Vane Test

Os ensaios foram realizados no aparelho de laboratório descrito em 3.2.3, seguindo em termos gerais o procedimento da norma (ASTM D 4648, 2000). Para cada série de ensaios preparou-se uma amostra, colocando o solo no molde de modo a constituir um material homogêneo sem bolhas de ar. Em cada amostra foram realizadas sete medições de modo a verificar a repetibilidade dos resultados. O tempo de armazenamento e manuseamento das amostras foi semelhante. A maioria das medições foi feita para uma velocidade de rotação de 6°/min e algumas para uma velocidade de rotação de 60°/min, o que permitiu confirmar que o corte das amostras foi realizado sob deformação controlada em condições não drenadas. As medições foram realizadas em intervalos de rotação regulares de 5°, até ser atingida uma rotação de 180°.

### 3.4.5 Ensaio Edométrico com permeabilidade

Os ensaios edométricos de permeabilidade foram realizados num aparelho montado para o efeito, descrito anteriormente em 3.2.3. Para cada série de ensaios moldou-se uma amostra no anel, tendo o cuidado de constituir um material homogéneo sem bolhas de ar. Os topos das amostras foram cobertos por discos de papel de filtro de igual diâmetro, para evitar a contaminação das pedras porosas com os finos do solo. Depois o conjunto foi instalado na célula sobre uma base porosa e no topo colocou-se a outra pedra porosa para permitir a drenagem livre da fase líquida pelas bases e a compressão axial vertical. Antes de instalar as amostras procedeu-se à saturação das pedras porosas e das linhas de água, fazendo circulação de água e purgando o ar do sistema.

Depois da montagem da célula no edómetro e da instalação dos sistemas de transmissão de carga e de medição das deformações verticais, as amostras foram lentamente submersas em água destilada, permanecendo sujeitas à ação do prato de carga superior e da carga de equilíbrio. Durante esta fase não foram observadas variações significativas da altura das amostras.

O método consistiu em aplicar incrementos de carga iguais à carga já instalada nas amostras saturadas, ou seja, em duplicar a carga em cada novo ciclo, e mantê-la constante durante as medições da deformação vertical resultante. Seguiu-se o procedimento recomendado na norma (BS 1377, 1990), o qual satisfaz os requisitos da (CEN (European Committee for Standardization), 2007), para os ensaios edométricos de compressão incremental. Adotaram-se níveis de tensão efetiva compreendidos entre 1 kPa e 100 kPa, em conformidade com as situações geotécnicas referidas em 3.1.

No final da fase de consolidação das amostras sob certos níveis de tensão, especificamente de 10, 20 e 45 kPa, realizou-se um ensaio de permeabilidade de carga constante. Primeiro fez-se percolar um volume de água de pelo menos o volume aparente da amostra, instalando uma diferença de 20 cm entre os níveis de água nos topos da amostra. De seguida, fizeram-se medições sucessivas do volume de água percolado por unidade de tempo, numa escala graduada em cm<sup>3</sup>, e por fim fecharam-se as linhas de água para se poder prosseguir com o subsequente escalão de carga.

### 3.5 Discussão e conclusão

Este Capítulo 3 trata três pontos fundamentais. Começa com a definição das variáveis experimentais, incluindo a descrição dos equipamentos por meio dos quais são determinadas as variáveis dependentes (resistência ao corte não drenado e permeabilidade). Segue com a descrição e caracterização dos materiais utilizados no estudo. Por fim apresenta a metodologia adotada para se atingirem os objetivos específicos do estudo.

O biopolímero caracteriza-se pela sua considerável capacidade em formar gel na presença de água, face às temperaturas ambiente em geotecnia, o que o pode tornar particularmente interessante para melhorar a resistência ao corte dos solos argilosos brandos, enquanto se espera uma diminuição considerável da permeabilidade destes solos sob níveis baixos de tensão.

Na caracterização do estado físico, os solos saturados contendo biopolímero foram interpretados como um sistema constituído por duas fases, designadamente a fase sólida (partículas do solo) e líquida. Envolvendo fases líquidas com viscosidades muito distintas, o teor em água deixa de ser uma propriedade física relevante. O índice de vazios torna-se particularmente útil por possibilitar o estabelecimento de uma relação entre o teor em biopolímero e a permeabilidade do solo.

## **Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos resultados**



## Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados

### 4.1 Estrutura do solo

Neste subcapítulo pretende-se identificar prováveis alterações na estrutura do solo causadas pelo gel de gelano, tendo por base os dados colhidos através de microscopia eletrónica de varrimento, realizada de acordo com a secção 3.4.2. Este ensaio foi realizado no Centro de Ótica - Laboratório de Microscopia Eletrónica da UBI que dispõe de inúmeros serviços para investigação e desenvolvimento científico e tecnológico nos domínios da ótica e da caracterização e análise de materiais. Optou-se por este ensaio como forma de estudo da microestrutura do solo, tendo como finalidade compreender melhor e explicar o efeito do gelano sobre o comportamento da areia argilosa saturada, em particular a resistência ao corte não drenado e a permeabilidade. Assim, começa-se por apresentar algumas das imagens da superfície das amostras, seguidas de uma breve descrição e análise. Para o efeito, considera-se apenas a amostra de controlo e a amostra contendo gelano numa concentração de 0,1%.

Foram geradas imagens que exibem variações espaciais das propriedades das amostras com as seguintes ampliações: 100x, 5000x, 10000x e 15000x. As Figuras 4.1, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12 e 4.14 mostram a superfície do solo após a secagem em estufa a 105°C. As Figuras 4.2, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 e 4.15 mostram a superfície do solo húmido (com um teor em água de 22%), quer para a amostra da areia argilosa quer para a amostra contendo 0,1% de gelano.

Imagens ampliadas 100x:



Figura 4.1 - Imagem ampliada 100x do solo seco (0% biopolímero)

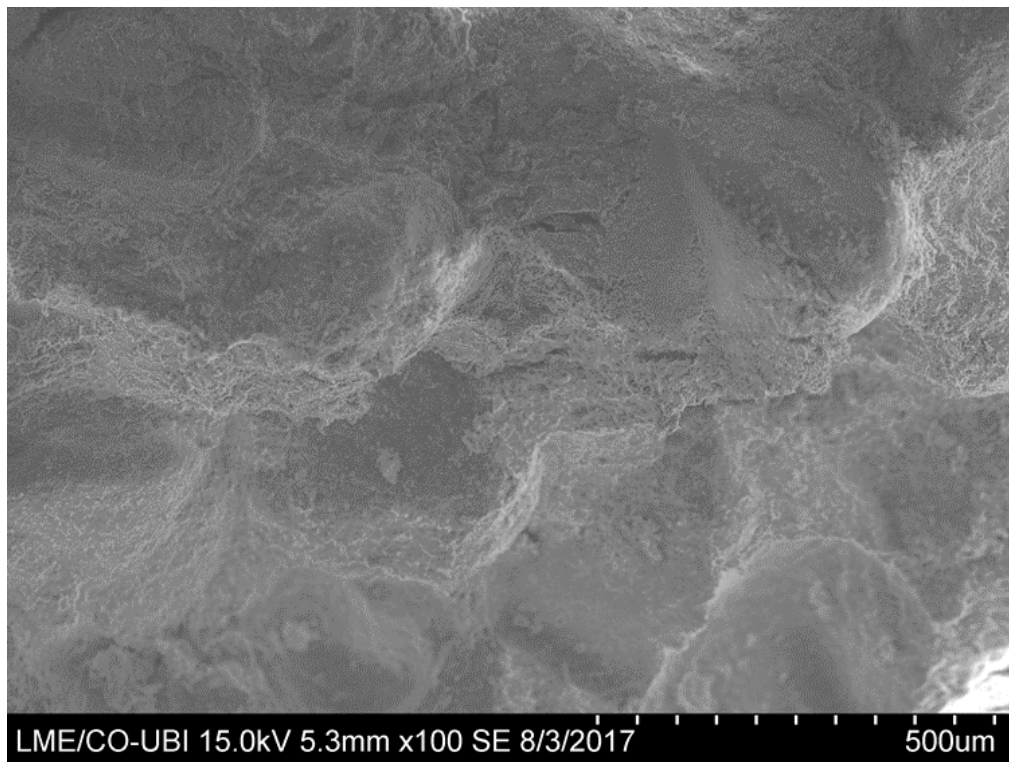
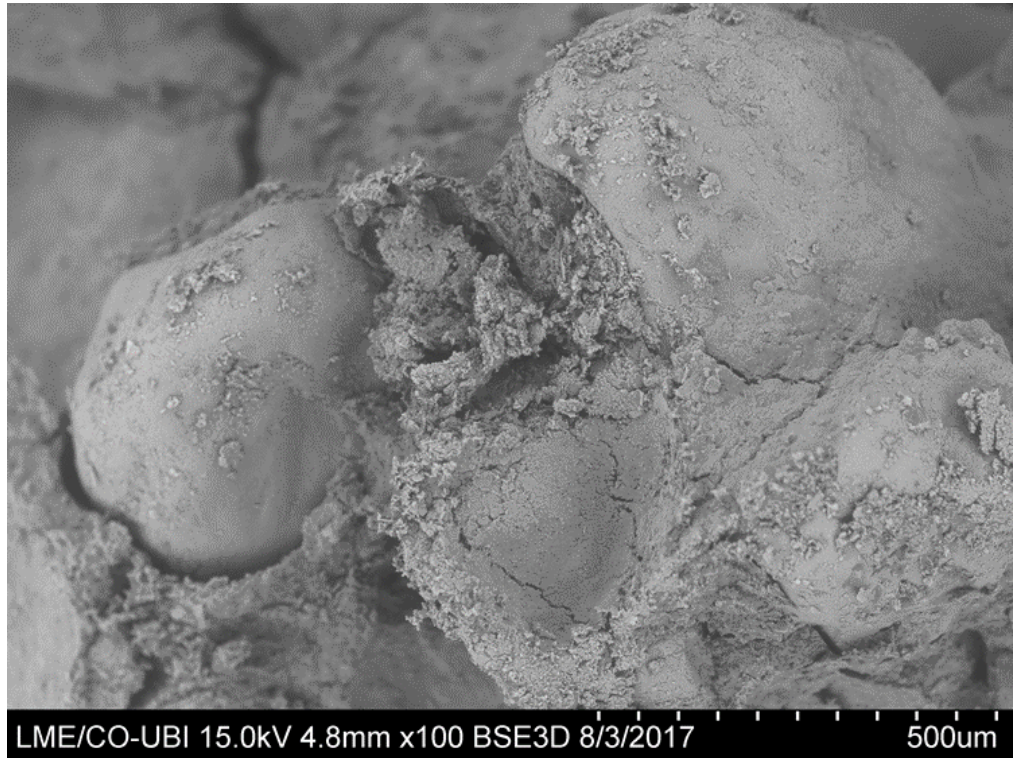


Figura 4.2 - Imagem ampliada 100x do solo húmido (0% biopolímero)





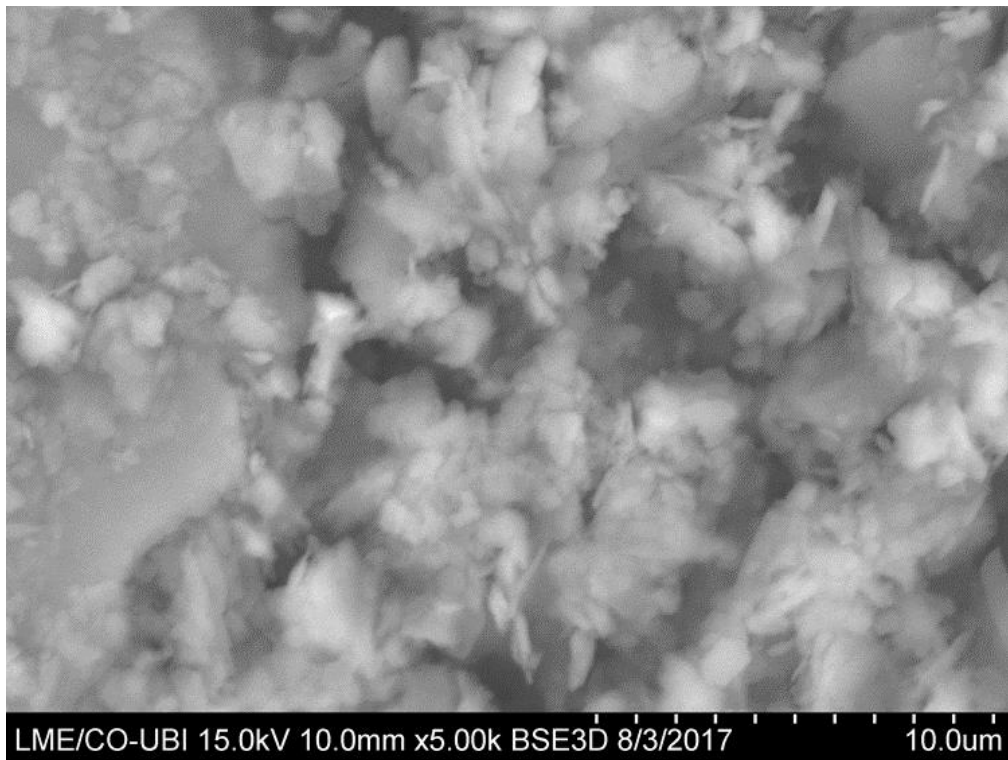
*Figura 4.3 - Imagem ampliada 100x do solo húmido (0,1% biopolímero)*

Não se registou a imagem ampliada de 100x no estado seco com uma concentração de 0,1% de gelano.

Imagens ampliadas 5000x:



*Figura 4.4 - Imagem ampliada 5000x do solo seco (0% biopolímero)*



*Figura 4.5 - Imagem ampliada 5000x do solo húmido (0% biopolímero)*



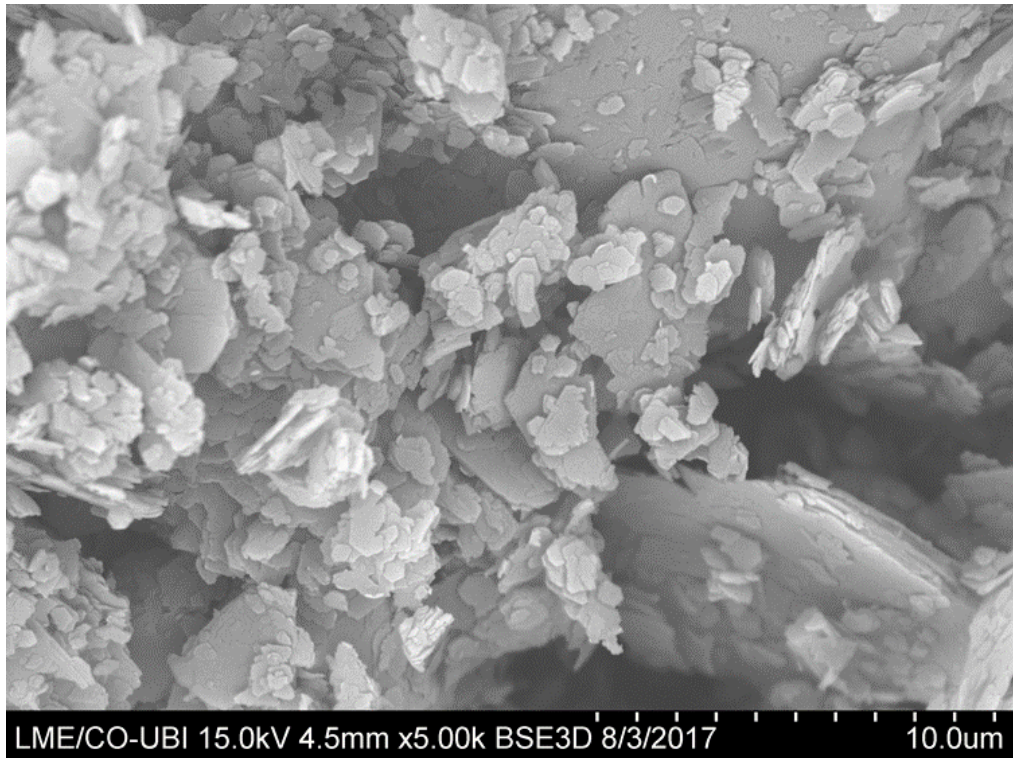


Figura 4.6 - Imagem ampliada 5000x do solo seco (0,1% biopolímero)

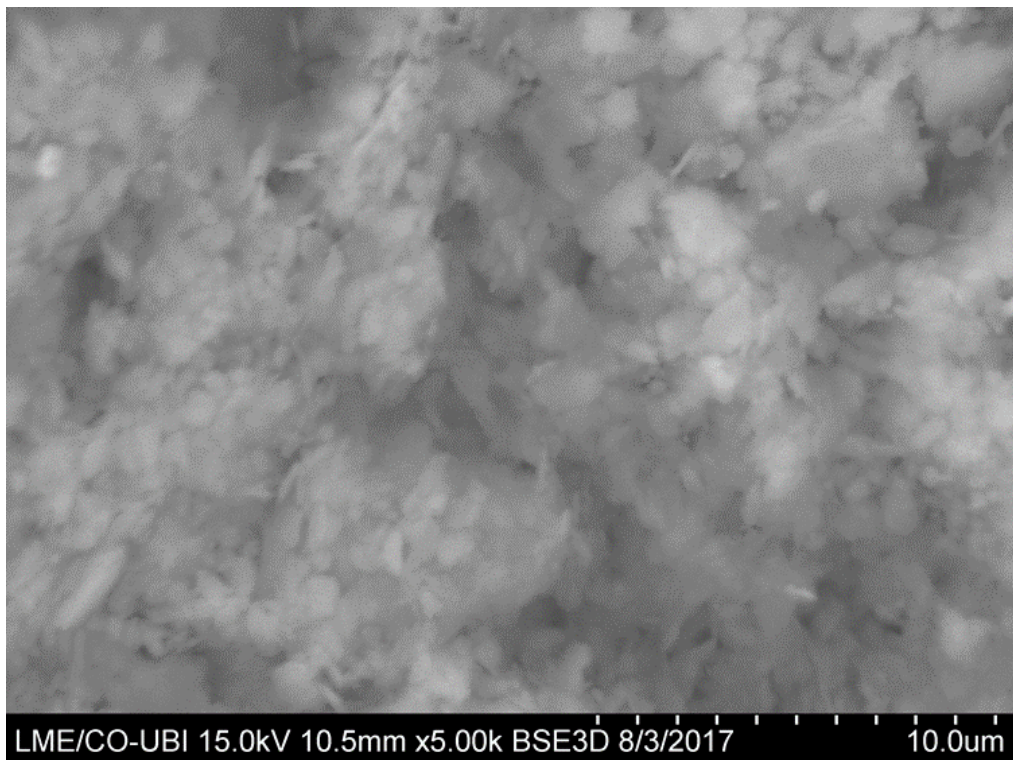
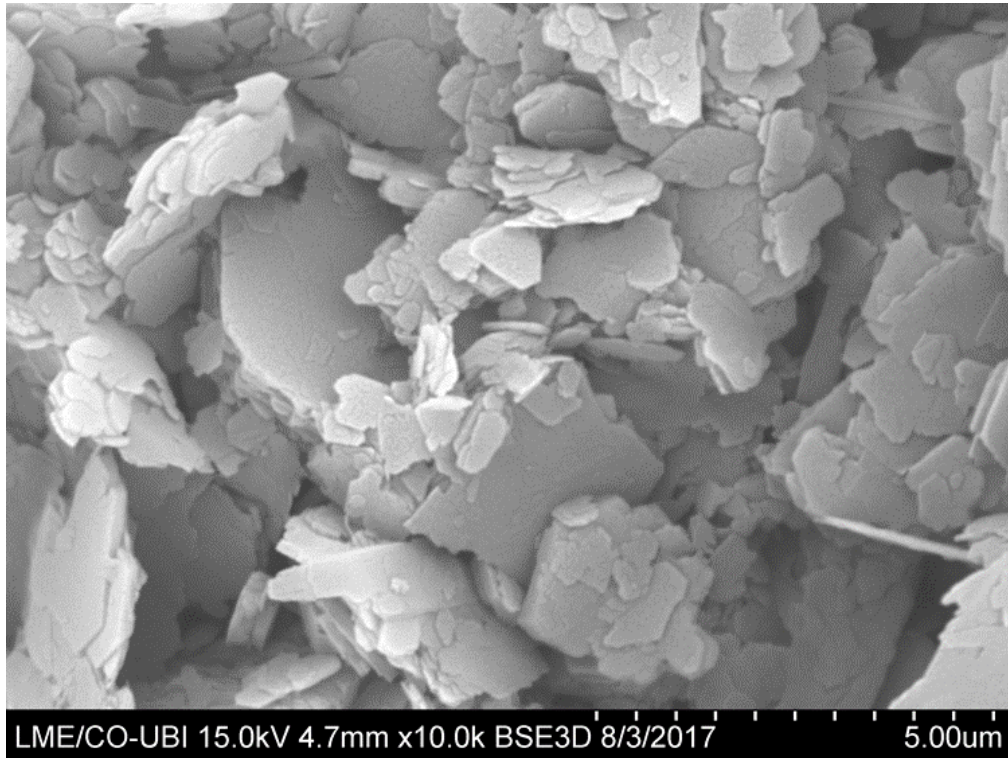
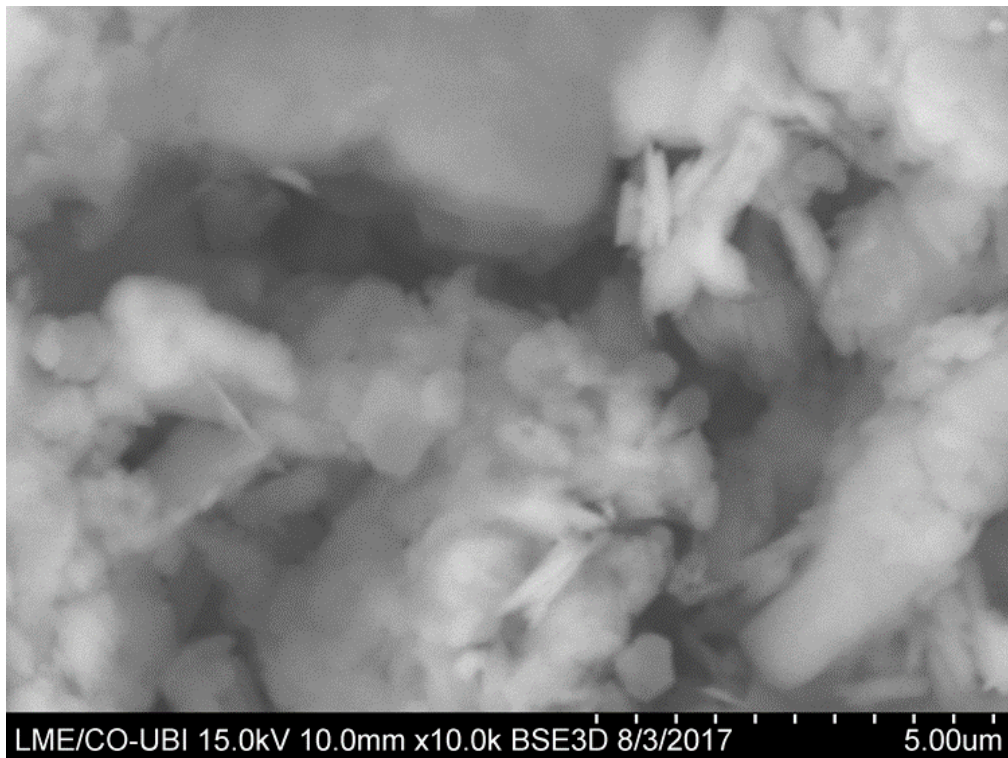


Figura 4.7 - Imagem ampliada 5000x do solo húmido (0,1% biopolímero)

Imagens ampliadas 10000x:



*Figura 4.8 - Imagem ampliada 10000x do solo seco (0% biopolímero)*



*Figura 4.9 - Imagem ampliada 10000x do solo húmido (0% biopolímero)*



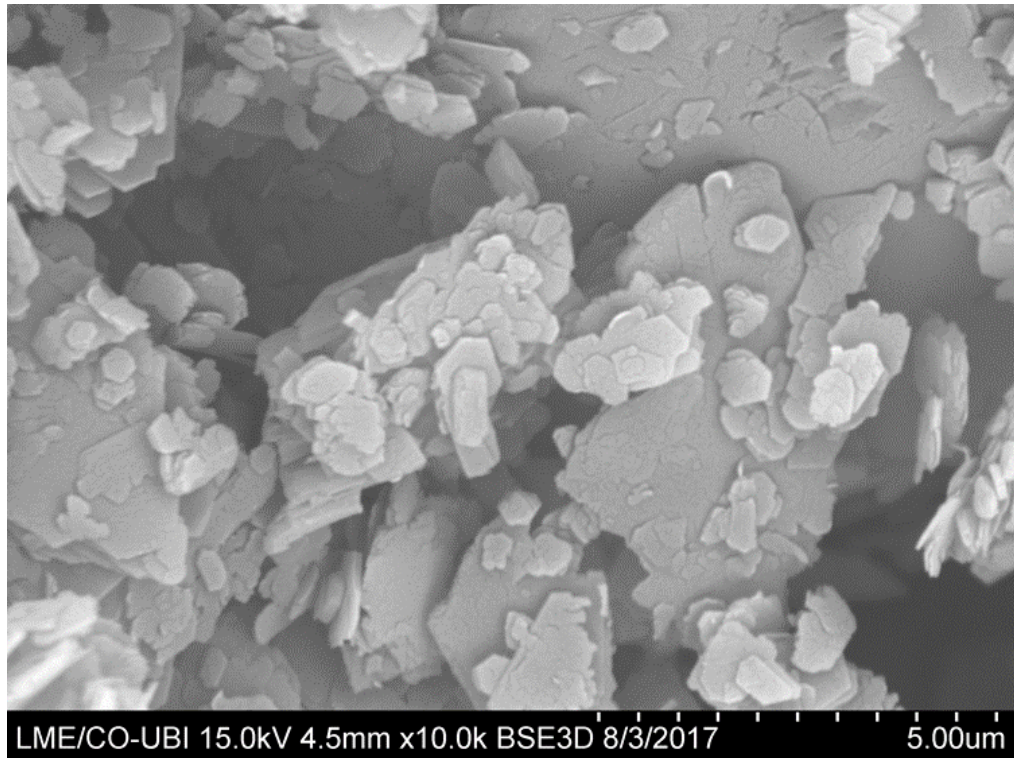


Figura 4.10 - Imagem ampliada 10000x do solo seco (0,1% biopolímero)

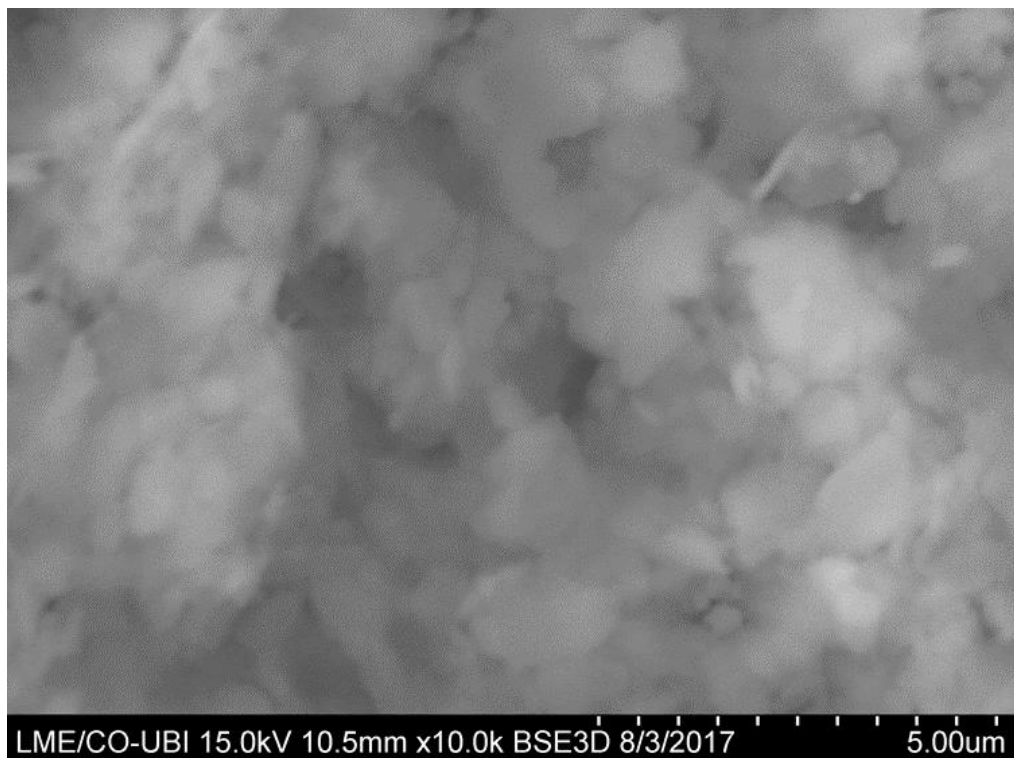
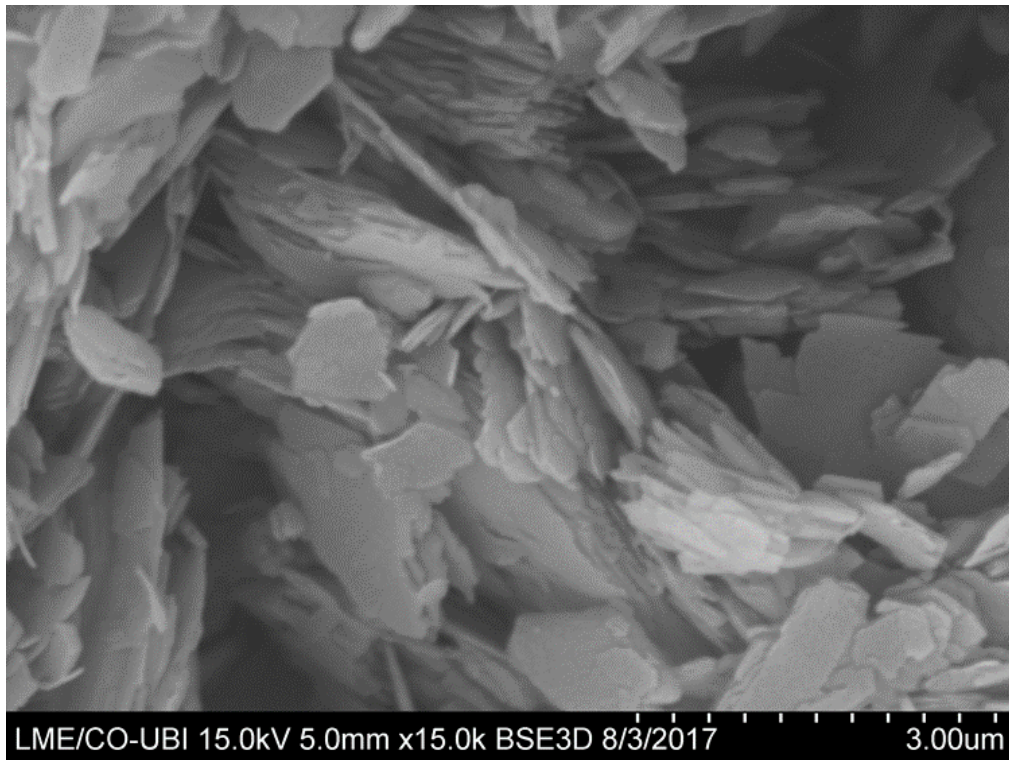


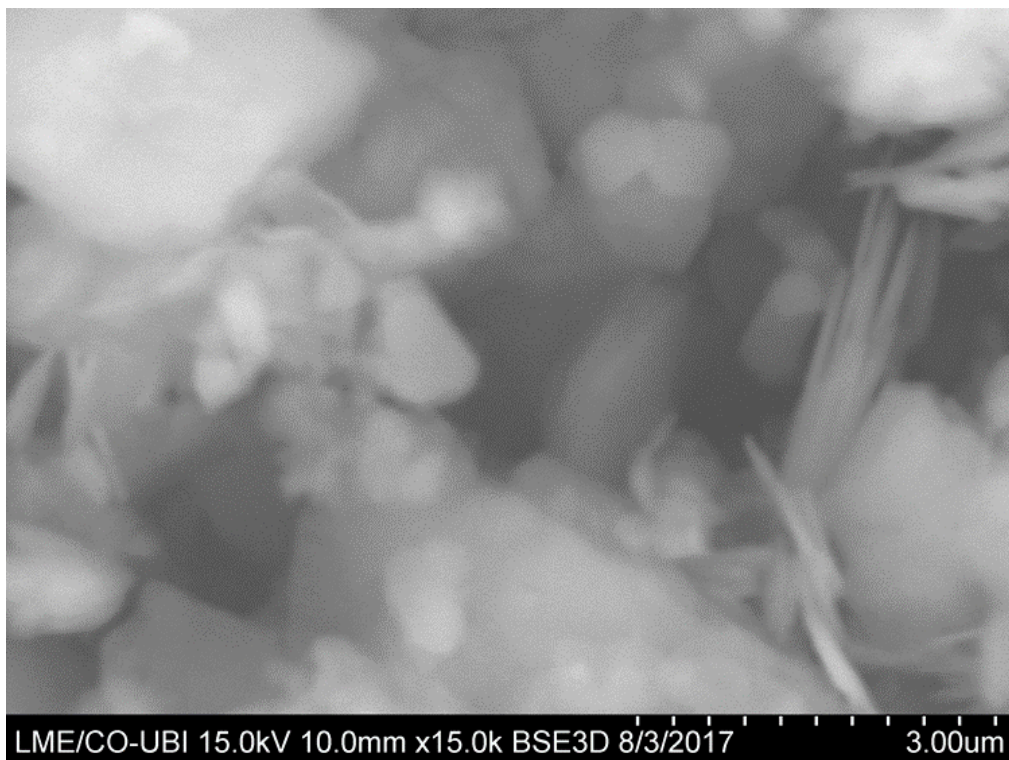
Figura 4.11 - Imagem ampliada 10000x do solo húmido (0,1% biopolímero)

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Imagens ampliadas 15000x:



*Figura 4.12 - Imagem ampliada 15000x do solo seco (0% biopolímero)*



*Figura 4.13 - Imagem ampliada 15000x do solo húmido (0% biopolímero)*



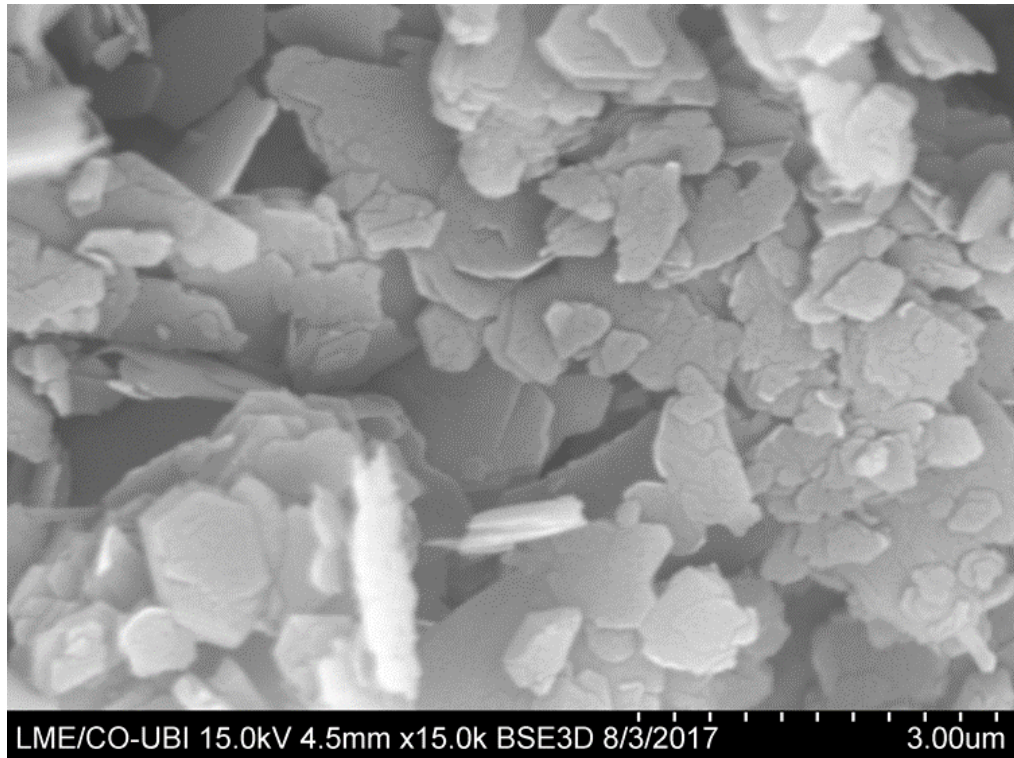


Figura 4.14 - Imagem ampliada 15000x do solo seco (0,1% biopolímero)

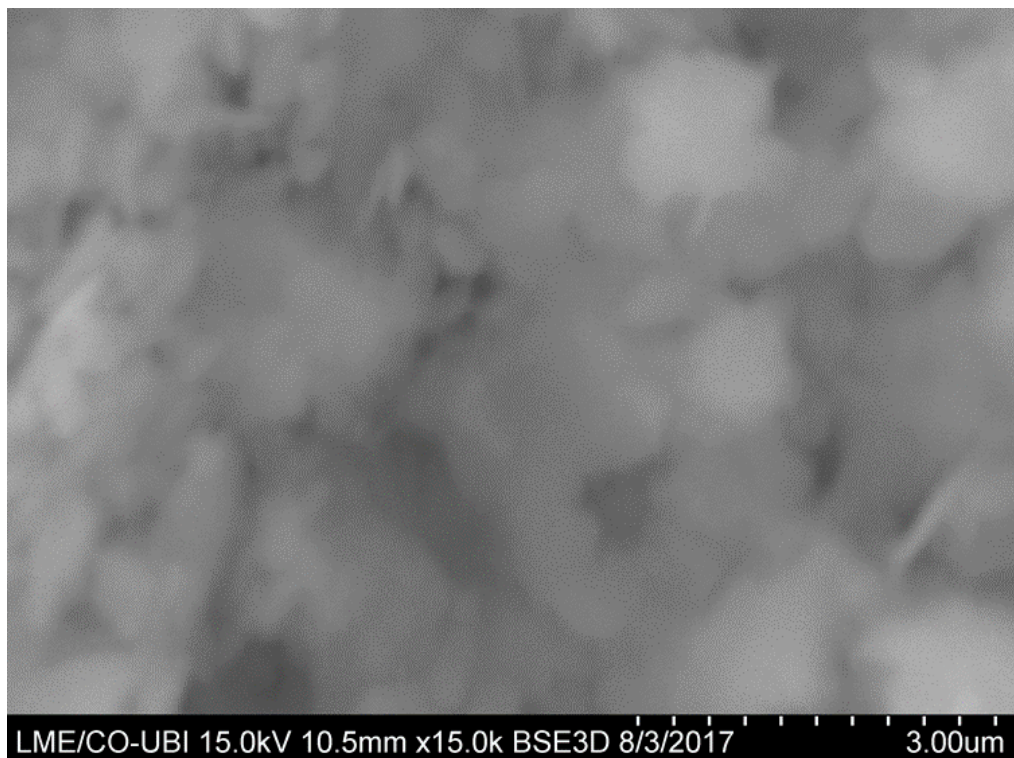


Figura 4.15 - Imagem ampliada 15000x do solo húmido (0,1% biopolímero)

O facto de as imagens da superfície do solo húmido estarem pouco nítidas tem a ver com o método de MEV, o qual reflete apenas a morfologia externa da parte sólida das amostras. Assim, enquanto na amostra de areia argilosa as partículas estão envolvidas por uma película de água, na amostra contendo biopolímero as partículas estão envolvidas por uma película de gel de gelano, o que explica a maior dificuldade em visualizar as partículas do solo.

Interessa notar que o gel de gelano é um material amorfo<sup>(1)</sup> e por isso o método de MEV não devolver a imagem da sua superfície, logo não ser visível nas imagens.

A análise das imagens geradas com uma ampliação de 100x permite observar que as partículas de areia na amostra de controlo se encontram dispersas e aderidas à pasta argilosa (Fig. 4.2) enquanto na amostra contendo biopolímero as partículas de areia aparecem de modo discreto parecendo desagregadas da pasta argilosa (Fig. 4.3).

Após uma observação de todas as imagens ampliadas do solo em estudo, percebe-se que quando o solo está seco as partículas encontram-se numa forma agregada, por sua vez quando o solo está húmido a amostra encontra-se mais homogénea. Com a presença do biopolímero, observou-se que as partículas do solo estão dispostas formando agregados, parecendo haver assim maior espaço de vazios.

A análise das imagens geradas com uma ampliação de 15000x permite observar ainda que a estrutura da amostra húmida se encontra relativamente mais coesa devido ao biopolímero (Figs. 4.13 e 4.15). Analisando as imagens da superfície do solo no estado seco (Figs. 4.12 e 4.14) constata-se que na amostra de controlo as partículas de argila se encontram dispostas paralelamente entre si, sendo nítido um certo afastamento entre elas. Na presença de biopolímero, as partículas de argila formam uma estrutura predominantemente floculada.

Em suma, parece que a textura do solo é alterada devido ao biopolímero, notando-se que as partículas se encontram dispostas em agregados. Contudo esta observação carece de uma análise mais detalhada, havendo assim a necessidade de estudar este assunto em trabalhos futuros. O grau de adesão dos agregados de partículas determina certamente a resistência e a permeabilidade do solo em condições saturadas, aspetos que são tratados a seguir.

---

<sup>1</sup> Amorfo: que não tem forma determinada; 1. mineralogia: não cristalino na estrutura; 2. química: diz-se do estado dos corpos cujos átomos ou moléculas se dispõem irregularmente



## 4.2 Resistência ao corte não drenado

### 4.2.1 Ensaio Fall Cone

No decorrer desta experiência laboratorial foram produzidos filmes dos ensaios, de modo a visualizar-se a penetração do cone no solo durante 5 segundos. Após as filmagens dos ensaios recorreu-se à utilização de um programa de tratamento de vídeo para se perceber a evolução da penetração do cone no solo mais detalhadamente. Com o auxílio do programa de tratamento de vídeo, fizeram-se frames do momento inicial da queda do cone e após 1, 2, 3, 4 e 5 segundos, conseguindo-se desta forma obter os valores de penetração ao longo dos 5 segundos estabelecidos para este ensaio.

Nos ensaios de *Fall Cone* em certos solos argilosos, após a penetração inicial pode observar-se um afundamento lento do cone, devido à influência da dilatância e migração da água no solo para junto da superfície do cone (ISO/TS 17892-6, 2004). No caso de se verificar este fenómeno, é a penetração inicial que deve ser considerada na interpretação e análise dos resultados do ensaio, o que justifica o procedimento adotado.

A Figura 4.16 mostra a evolução da penetração do cone nas amostras de solo contendo biopolímero, indicando que as medições da penetração final podem ser usadas na estimativa da resistência ao corte não drenado.

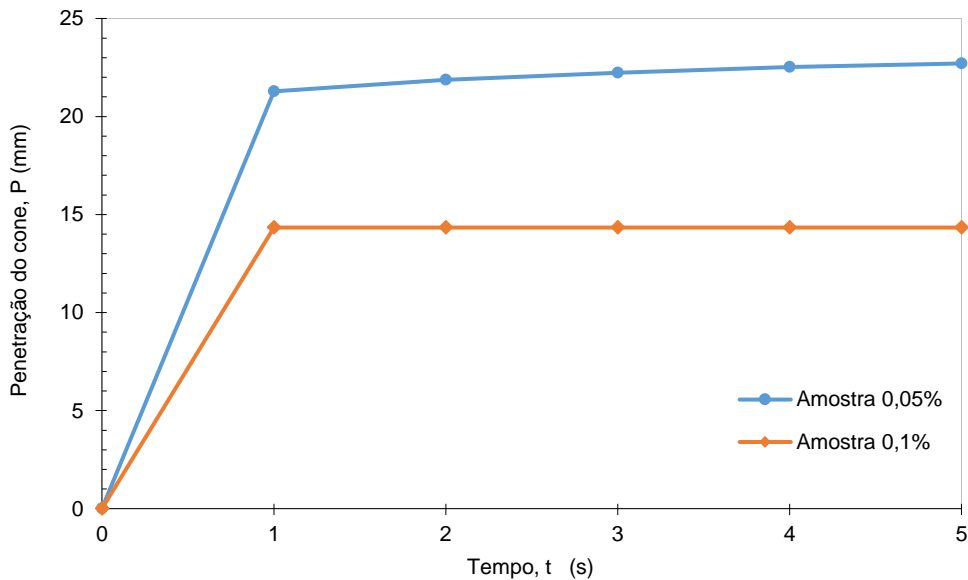


Figura 4.16 - Evolução da penetração do cone

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Com o valor médio das três medições da penetração calculou-se a resistência ao corte não drenado ( $c_{ufc}$ ) das amostras, usando a expressão 4.1. Nas Tabelas 4.1 a 4.3 são apresentados os resultados assim obtidos.

$$c_{ufc} = c \cdot g \cdot \frac{m}{i^2} \quad 4.1$$

Onde:

- $c$  é uma constante, dependente do ângulo da ponta do cone, sendo  $c = 0,8$  para cones com  $30^\circ$  de ponta;
- $g$  é a aceleração devido à gravidade, que toma o valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;
- $m$  é a massa do cone,  $m = 80 \text{ g}$ ;
- $i$  é a média de penetração do cone (mm).

Tabela 4.1 - Penetração média e resistência ao corte não drenado ao longo do ensaio para a amostra com 0,05% de biopolímero.

Amostra 0,05%						
Segundos	0	1	2	3	4	5
$P_{\text{médio}}$ (mm)	0	21,28	21,88	22,22	22,53	22,71
$c_{ufc}$ (kPa)	0	1,39	1,31	1,27	1,24	1,22

Tabela 4.2 - - Penetração média e resistência ao corte não drenado ao longo do ensaio para a amostra com 0,1% de biopolímero.

Amostra 0,1%						
Segundos	0	1	2	3	4	5
$P_{\text{médio}}$ (mm)	0	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34
$c_{ufc}$ (kPa)	0	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05

Tabela 4.3 - Valores máximos da resistência ao corte não drenado em cada uma das amostras analisadas.

$\epsilon$ (%)	$c_{u,fc}$ (kPa)
	$\omega = 22\%$
0	-
0,05	1,39
0,1	3,05

A Figura 4.17 mostra a relação entre a resistência ao corte não drenado e o teor em biopolímero, evidenciando uma correlação positiva entre essas variáveis.

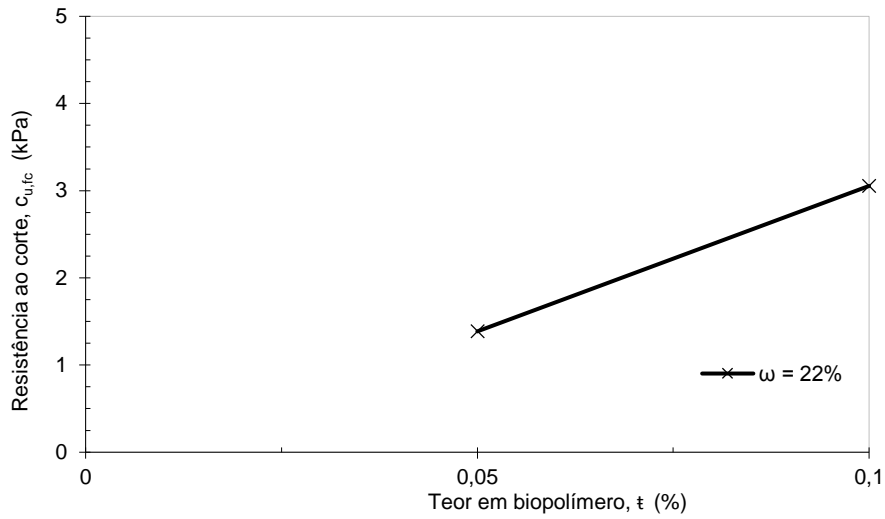


Figura 4.17 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na resistência ao corte não drenado do solo

#### 4.2.2 Ensaio Vane Test

Os resultados apresentados e discutidos nesta secção têm por base os dados apresentados no Anexo A2.2. Após a obtenção dos valores correspondentes do cálculo do torque e do cálculo da resistência ao corte não drenado demonstrados nas tabelas A2.11 e A2.12 foram criados diagramas do torque versus ângulo de rotação para os diferentes tipos de solo em estudo.

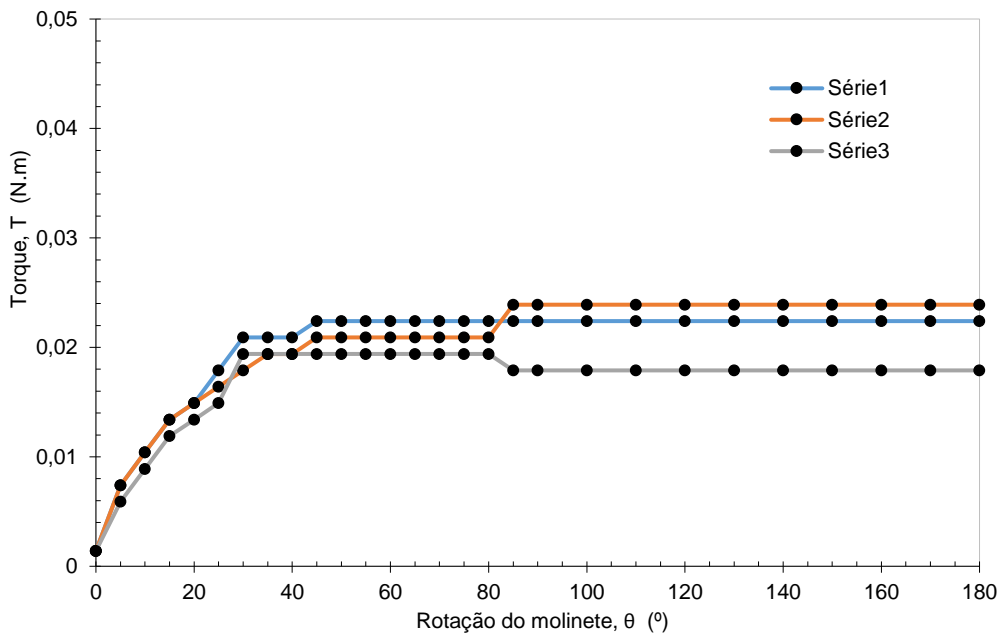


Figura 4.18 - Diagrama torque (T) versus ângulo de rotação do molinete ( $\theta$ ): amostra com  $\epsilon = 0,05\%$

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

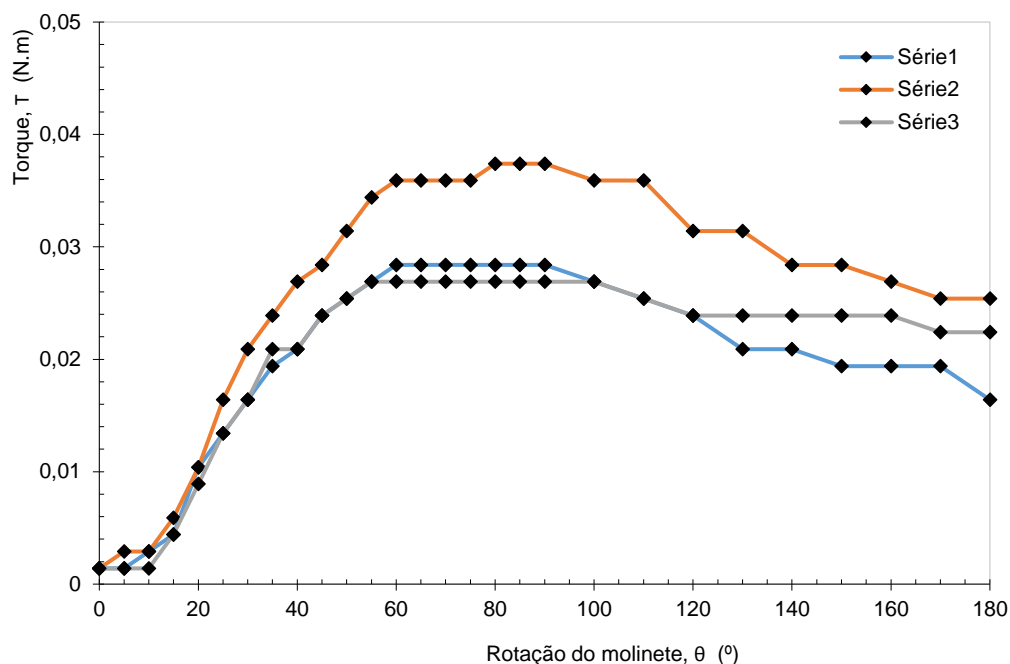


Figura 4.19 - Diagrama torque (T) versus ângulo de rotação do molinete (θ): amostra com  $\epsilon = 0,1\%$

Por fim apresenta-se na Tabela 4.4 e na Figura 4.20 a relação entre o teor em biopolímero e a resistência ao corte do solo, evidenciando também uma correlação positiva entre as variáveis.

Para o cálculo da resistência ao corte não drenado, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$T = \tau \times K \Leftrightarrow \tau = \frac{T}{K} \quad 4.2$$

Assumindo que a distribuição da resistência ao corte é uniforme em toda a superfície de corte. K é uma constante que depende da geometria do molinete utilizado, cujo valor é  $7,508 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ .

Tabela 4.4 - Valores máximos da resistência ao corte não drenado em cada uma das amostras analisadas

$\epsilon$ (%)	$c_{u,v}$ (kPa)
	$\omega = 22\%$
0	0
0,05	2,92
0,1	4,12

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

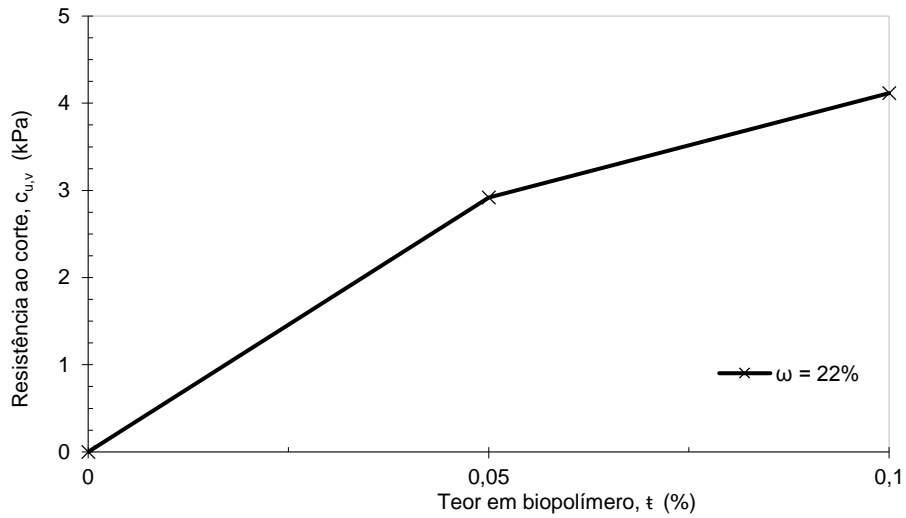


Figura 4.20 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na resistência ao corte não drenado do solo

### 4.3 Permeabilidade

Tendo em conta o que se concluiu no Capítulo 3, começa-se por apresentar os resultados do ensaio de consolidação na Figura 4.21 que mostra a relação entre o índice de vazios e a tensão efetiva para cada série de ensaios. A descrição detalhada do procedimento para o cálculo do índice de vazios encontra-se no anexo A2. É possível observar que a compressibilidade diminui quando a concentração de gelano aumenta para 0,1%.

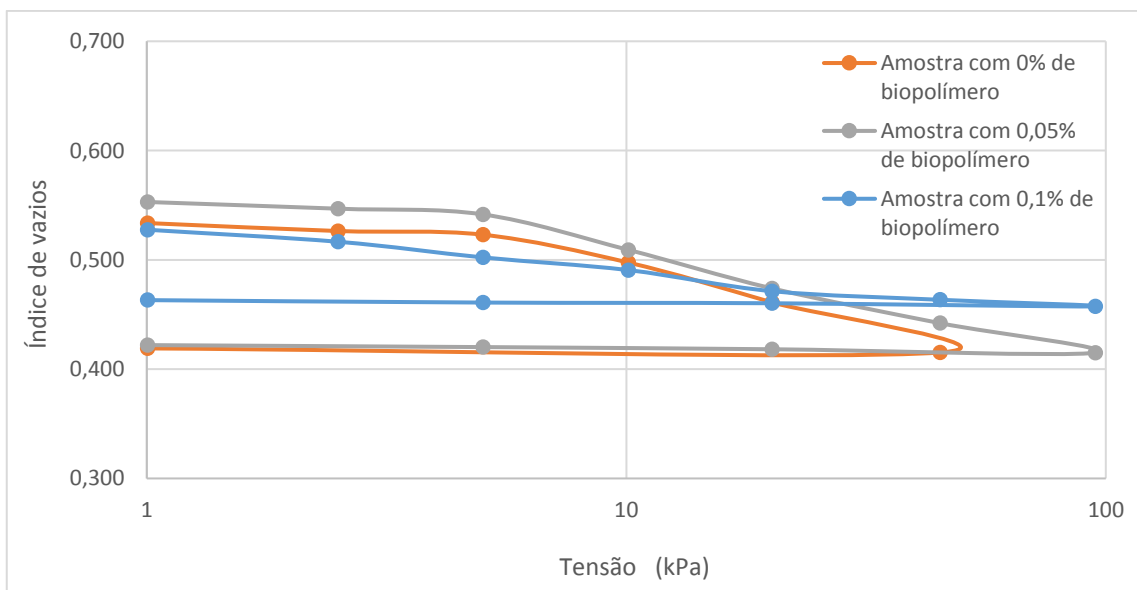


Figura 4.21 - Resultados do ensaio de consolidação

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

A permeabilidade medida nos 4º, 5º e 6º escalões de carga deste ensaio, foi calculada tendo por base a lei de Darcy (Equação 4.2).

$$v = k * i \quad 4.3$$

onde  $v$  é a velocidade média de percolação, determinada pela razão entre o volume de água percolada na unidade de tempo através da secção da amostra,  $i$  é o gradiente hidráulico definido pela razão entre a carga hidráulica e a espessura da amostra (Equação 4.4) e  $k$  é a permeabilidade, a qual traduz a relação linear entre as grandezas anteriores.

$$\frac{20 - \Delta H}{200} = i \begin{cases} H = H_0 - \Delta H \\ h_w = 20 \text{ cm} \end{cases} \quad 4.4$$

Nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam-se os valores calculados para a permeabilidade das 3 amostras em estudo.

*Tabela 4.4 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0% de biopolímero*

Permeabilidade					
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	$i$ (cm/cm)	$q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$S$ (cm <sup>2</sup> )	$k$ (m/s)
1,0	0,185				
2,5	0,279				
5,0	0,323				
10,1	0,652	0,09674	0,0045045	19,63495	2,37E-05
20,1	1,123	0,094385	0,0023256	19,63495	1,25E-05
45,1	1,715	0,091425	0	19,63495	0
95,1					
20,1					
5,0					
1,0	1,667				

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

*Tabela 4.5 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0,05% de biopolímero*

Permeabilidade					
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	i (cm/cm)	q (cm <sup>3</sup> /s)	S (cm <sup>2</sup> )	k (m/s)
1,0	0,219				
2,5	0,297				
5,0	0,364				
10,1	0,777	0,096115	0,0142857	19,63495	7,57E-05
20,1	1,226	0,09387	0,0022727	19,63495	1,23E-05
45,1	1,631	0,091845	0	19,63495	0
95,1	1,975				
20,1	1,935				
5,0	1,91				
1,0	1,887				

*Tabela 4.6 - Cálculo da permeabilidade da amostra com 0,1% de biopolímero*

Permeabilidade					
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	i (cm/cm)	q (cm <sup>3</sup> /s)	S (cm <sup>2</sup> )	k (m/s)
1,0	0,214				
2,5	0,356				
5,0	0,542				
10,1	0,692	0,09654	0,2	19,63495	1,06E-03
20,1	0,942	0,09529	0,2	19,63495	1,07E-03
45,1	1,044	0,09478	0,2	19,63495	1,07E-03
95,1	1,122				
20,1	1,085				
5,0	1,077				
1,0	1,048				

Contrariamente ao que seria de esperar, isto é, uma diminuição da permeabilidade com o aumento da concentração de biopolímero, dado que na fase líquida existe gel de gelano (que apresenta uma viscosidade muito superior à da água). Assim estes resultados podem ser explicados tendo por base as observações decorrentes da microscopia eletrónica de varrimento que indicam uma alteração da estrutura do solo causada pelo gelano, no sentido de promover a agregação das partículas mais finas, aumentando deste modo a macro porosidade, com o aumento da permeabilidade do material.

Por fim apresenta-se na Tabela 4.7 e na Figura 4.22 a relação entre o teor em biopolímero e a permeabilidade, evidenciando assim uma correlação positiva entre as variáveis.

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

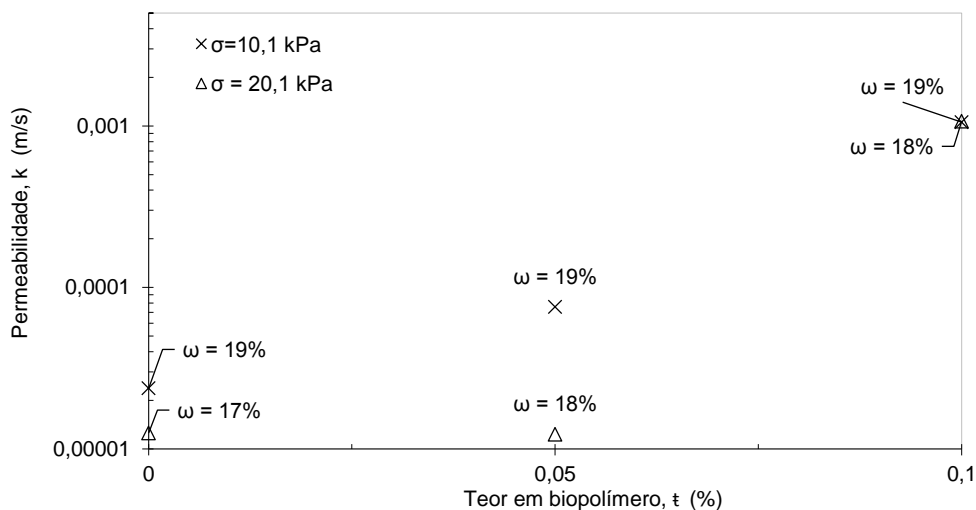


Figura 4.22 - Efeito do aumento do teor em biopolímero na permeabilidade do solo, para diferentes teores em água

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de permeabilidade

$\epsilon$ (%)	k (m/s)		
	10,1	20,1	45,1
0	2,37E-05	1,25E-05	0,00E+00
0,05	7,57E-05	1,23E-05	0,00E+00
0,1	1,06E-03	1,07E-03	1,07E-03

## 4.4 Discussão e conclusão de resultados

Ao longo deste capítulo foram tecidas algumas conclusões que se pretende nesta fase sintetizar.

Relativamente à microscopia eletrónica de varrimento sintetiza-se que a textura do solo é alterada devido ao uso do gelano, notando-se nas ampliações que as partículas se encontram dispostas em agregados, contudo esta observação carece de uma análise mais detalhada, havendo assim a necessidade de estudar este assunto em trabalhos futuros.

No ensaio *Fall Cone*, observou-se que o solo com 0,05% de concentração de gelano apresentou durante o ensaio um pós-afundamento do cone ao longo dos 5s de ensaio, devido à influência da dilatância e migração da água na amostra, como é apresentado na Tabela 4.1. Enquanto que no solo com 0,1% de concentração de gelano a penetração do cone foi a mesma desde a queda inicial (Tabela 4.2). Conclui-se que a resistência ao corte não drenado aumenta quando a concentração de biopolímero também aumenta.



## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

No ensaio *Vane Test*, com a criação dos diagramas de torque *versus* ângulo de rotação do molinete percebe-se que a amostra com uma maior concentração de biopolímero requer um valor mais elevado de torque. Através deste ensaio, concluiu-se pela Tabela 4.4 e Figura 4.20 que quanto maior é a concentração de biopolímero no solo, maior é a resistência ao corte não drenado.

Para o ensaio edométrico com medição de permeabilidade, observa-se que a compressibilidade diminui quando a concentração de gelano aumenta para a amostra de 0,1% (Figura 4.21). Concluiu-se também que existe um aumento da permeabilidade com o aumento da concentração de biopolímero, contrariamente ao que seria de esperar. Assim estes resultados podem ser explicados tendo por base as observações decorrentes da microscopia eletrónica de varrimento que indicam uma alteração da estrutura do solo causada pelo gelano, no sentido de promover a agregação das partículas mais finas, aumentando deste modo a permeabilidade do material.



## **Capítulo 5 - Conclusão e Desenvolvimento Futuro**



# Capítulo 5 - Conclusão e Desenvolvimento Futuro

## 5.1 - Considerações finais

Os processos através dos quais a biologia pode modificar as propriedades dos solos com interesse para a Engenharia Civil dependem do tipo de organismos envolvidos. As raízes de plantas podem promover a densificação do solo ou o aumento da sua permeabilidade, os insetos e invertebrados podem provocar o aumento da percolação dos maciços, e a atividade biológica pode melhorar a resistência e rigidez do solo. O processo que tem merecido alguma consideração é o estabelecimento de vegetação, particularmente do sistema de raízes, havendo já modelos que permitem avaliar a estabilidade de taludes revestidos com vegetação, como é exemplo o método conceptual desenvolvido por Mendonça e Cardoso (1998).

Face ao contexto apresentado, o objetivo do estudo foi contribuir para o conhecimento sobre o comportamento dos solos contendo biopolímero. Dada a considerável capacidade de retenção de água por parte do biopolímero torna-se indispensável a análise com mais detalhe do efeito da presença de sólidos orgânicos nos solos argilosos brandos, especificamente, na resistência ao corte e na permeabilidade, em condições saturadas.

Estabeleceram-se as variáveis experimentais, incluindo a descrição dos equipamentos por meio dos quais são determinadas as variáveis dependentes (resistência ao corte não drenado e permeabilidade). Utilizou-se um biopolímero comercial, que se caracteriza pela sua considerável capacidade em formar gel na presença de água, face às temperaturas ambiente em geotecnia.

Na caracterização do estado físico, os solos saturados contendo biopolímero foram interpretados como um sistema constituído por duas fases, designadamente a fase sólida (partículas do solo) e líquida. Não se levou em linha de conta o facto do material envolver fluidos com viscosidades muito distintas. Por isso, o índice de vazios tornou-se particularmente útil por possibilitar o estabelecimento de uma relação entre o teor em biopolímero e a permeabilidade do solo.

O resultado dos ensaios *Fall Cone* e *Vane Test*, mostram que a resistência ao corte não drenado aumenta quando a concentração de biopolímero também aumenta, para os teores estudados.

Do ensaio edométrico com medição de permeabilidade, observou-se que a compressibilidade diminui quando a concentração de gelano aumenta para 0,1%. Concluiu-se também que existe um aumento da permeabilidade com o aumento da concentração de biopolímero, na gama de teores estudados.

Assim estes resultados podem ser explicados tendo por base as observações decorrentes da microscopia eletrónica de varrimento que indicam uma alteração da estrutura do solo causada pelo gelano, que parece promover a agregação das partículas mais finas, aumentando a dimensão dos poros e deste modo a permeabilidade do material.

## 5.2 - Principais conclusões

Face ao exposto na secção anterior, as principais conclusões do presente trabalho são:

- Nos ensaios Fall Cone e Vane Test, concluiu-se que a resistência ao corte não drenado aumenta quando a concentração de biopolímero também aumenta.
- Para o ensaio edométrico com medição de permeabilidade, observa-se que a compressibilidade diminui quando a concentração de gelano aumenta para 0,1%. Concluiu-se também que existe um aumento da permeabilidade com o aumento da concentração de biopolímero.
- Estas conclusões podem ser explicadas tendo por base as observações decorrentes da microscopia eletrónica de varrimento que indicam uma alteração da estrutura do solo causada pelo gelano, que parece promover a agregação das partículas mais finas, aumentando deste modo a macro-porosidade do material.

As conclusões apresentadas são válidas apenas para o caso de solos argilosos brandos, e por isso não podem ser generalizados para outras situações nem para diferentes graus de saturação.

### **5.3 - Sugestões para investigações futuras**

Para o prosseguimento do estudo apresentado na presente dissertação, são formuladas algumas sugestões e orientações breves para investigações futuras na expectativa de virem a ser desenvolvidas com resultados frutuoso:

- 1 Análise mais detalhada do efeito do biopolímero (gelano) na estrutura do solo, recorrendo à microscopia eletrónica de varrimento (MEV)
- 2 Compreensão do efeito da fase gel de gelano na fase fluída dos solos
- 3 Análise mais alargada dos aspetos abordados na presente dissertação, em termos do grau de saturação





## Referências Bibliográficas

- ASTM D 2487. (1985). Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International, West Conshohocken, Pa. Www.astm.org*.
- ASTM D 4648. (2000). Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated. *ASTM International, West Conshohocken, Pa. Www.astm.org*, 1-7. <https://doi.org/10.1520/D4648>
- Beckman Coulter Inc. (2011). Coulter LS series, product manual. *Tecdoc Pn 4237214Ea*, (October), 4-3.
- BS 1377. (1990). Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests.
- CEN (European Committee for Standardization). (2007). ENV 1997-2: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing.
- Costa, J. N. P., Venda Oliveira, P. J., da Costa, M. S., & Nobre, M. F. (2012). Biostabilization of Soils : Laboratory Analysis. *13º Congresso Nacional de Geotecnia: Pensar E Construir Com a Natureza. Uma Visão Para a Engenharia, LNEC,, Lisboa, Portugal*.
- Dejong, J. T., Burbank, M., Kavazanjian, E., Weaver, T., Montoya, B. M., Hamdan, N., ... Palomino, A. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Biogeochemical Processes and Geotechnical Applications: Progress, Opportunities and Challenges. Geotechnique, Vol 63, nº4 (2013), Pp. 287-301., 63(4), 287-301. https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017*
- DeJong, J., Tibbett, M., & Fourie, A. (2013). Geotechnical systems that evolve with ecological processes. *Environmental Earth Sciences, 73(3), 1067-1082. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3460-x*
- Haase, H., & Schanz, T. (2015). Hydro-mechanical properties of Calcigel-polyacrylamide composites. *Clay Minerals, 50(3), 377-389. https://doi.org/10.1180/claymin.2015.050.3.10*
- ISO/TS 17892-12. (2004). Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits.
- ISO/TS 17892-3: (2004). Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density - Pycnometer method.
- ISO/TS 17892-6. (2004). Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 6: Fall cone test.
- Mendonça, A. A., & Cardoso, A. S. (1998). Contribuição da Vegetação para a Estabilidade de Taludes. Parte I - Enquadramento Geral. *Contribuição Da Vegetação Para a Estabilidade de Taludes. Parte I - Enquadramento Geral. Geotecnia, SPG, nº82, Pp. 51-62*.
- Redmile-Gordon, M. A., Brookes, P. C., Evershed, R. P., Goulding, K. W. T., & Hirsch, P. R. (2014). Measuring the soil-microbial interface: Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from soil biofilms. *Measuring the Soil-Microbial Interface: Extracion of Extracellular Polymeric Substances (EPS) from Soil Biofilms. Soil Biology and Biochemistry, 72, 163-171. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.025*



## **Anexos**



## Lista de Figuras

Figura A1. 1 - Desenho esquemático do equipamento COULTER LS200 - Variable Speed Fluid Module Plus (Beckman Coulter Inc., 2011) .....	77
Figura A1. 2 - Curvas granulométricas de areia, argila e areia argilosa .....	82
Figura A1. 3 - Relação entre o teor em água e a respetiva penetração do cone .....	84
Figura A2. 1 - Determinação da massa volúmica das partículas pelo Método do picnómetro líquido .....	75
Figura A2. 2 - Reta de calibração .....	90



## Lista de Tabelas

Tabela A1. 1 - Registos e cálculo da massa volúmica .....	76
Tabela A1. 2 - Estimativa do valor da massa volúmica.....	76
Tabela A1. 3 - Análise granulométrica da areia .....	78
Tabela A1. 4 - Análise granulométrica da argila .....	79
Tabela A1. 5 - Cálculo da percentagem de acumulados da areia argilosa.....	80
Tabela A1. 6 - Cálculo da percentagem de acumulados da areia argilosa (continuação).....	81
Tabela A1. 7 - Frações granulométricas da areia argilosa.....	82
Tabela A1. 8 - Resultados dos ensaios de determinação do limite de liquidez .....	84
Tabela A1. 9 - Resultado do ensaio de determinação do limite de liquidez .....	84
Tabela A2. 1 - Penetração do cone após 1 s .....	85
Tabela A2. 2 - Penetração do cone após 2 s .....	85
Tabela A2. 3 - Penetração do cone após 3 s .....	85
Tabela A2. 4 - Penetração do cone após 4 s .....	86
Tabela A2. 5 - Penetração do cone após 5 s .....	86
Tabela A2. 6 - Teor em água.....	86
Tabela A2. 7 - Ensaio Vane Test para a amostra com 0% de biopolímero.....	87
Tabela A2. 8 - Ensaio Vane Test para a amostra com 0,05% de biopolímero.....	88
Tabela A2. 9 - Ensaio Vane Test para a amostra com 0,1% de biopolímero .....	89
Tabela A2. 10 - Valores de torque e consequente deflexão da mola 4 .....	90
Tabela A2. 11 - Valores de torque e da resistência ao corte não drenado para a amostra com 0,05% de biopolímero .....	91
Tabela A2. 12 - Valores de torque e da resistência ao corte não drenado para a amostra com 0,1% de biopolímero.....	92
Tabela A2. 13 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra de controlo.....	93
Tabela A2. 14 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra de controlo (continuação).....	94
Tabela A2. 15 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,05\%$ .....	95
Tabela A2. 16 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,05\%$ (continuação) .....	96
Tabela A2. 17 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,05\%$ (continuação 2) .....	97
Tabela A2. 18 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,1\%$ .....	98

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 19 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,1\%$ (continuação).....	99
Tabela A2. 20 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com $\epsilon=0,1\%$ (continuação 2) .....	100
Tabela A2. 21 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0% de biopolímero .....	101
Tabela A2. 22 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0,05% de biopolímero .....	101
Tabela A2. 23 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0,1% de biopolímero.....	102



## Anexo 1 - Caracterização do solo utilizado

Neste Anexo 1 são apresentados os ensaios de identificação e classificação do solo em estudo. De um modo muito resumido, descrevem-se os procedimentos de ensaio e apresentam-se os dados de medição, os cálculos e a estimativa dos valores das propriedades do solo com interesse para o estudo.

### A1. Características físicas do solo

#### A1.1 - Determinação da massa volúmica das partículas dos solos

##### Termo e definição

A massa volúmica das partículas ( $\rho_s$ ) é a massa seca das partículas a dividir pelo seu volume, expressa em  $Mg/m^3$ .

##### Procedimento

O procedimento experimental adotado foi o da norma ISO/TS 17892-3:2004 (ISO/TS 17892-3:, 2004). Cada provete húmido foi colocado no picnómetro, cujo volume nominal é de 100 ml, e adicionou-se água destilada. O ar aprisionado no provete foi removido por ligeiro aquecimento. Determinou-se a massa seca dos provetes por secagem em estufa a uma temperatura constante de cerca de 105°C. Procedeu-se a duas medições de cada amostra, de modo a verificar que os valores determinados diferem do valor médio menos de 0,03.



Figura A2. 1 - Determinação da massa volúmica das partículas pelo Método do picnómetro líquido

**Registos e cálculo da massa volúmica da areia e da argila**

Tabela A1. 1 - Registos e cálculo da massa volúmica

Nº	Areia		Argila	
	S1	S2	C1	C2
m <sub>0</sub> (g)	58,15	59,14	48,26	46,92
m <sub>1</sub> (g)	157,82	158,86	146,22	147,8
T <sub>1</sub> (°C)	24	24	24	24
m <sub>3</sub> (g)	179,68	174,43	150,85	153,89
T <sub>3</sub> (°C)	24	24	24	24
m <sub>4</sub> (g)	34,98	25,03	7,45	9,75
m <sub>2</sub> (g)	93,13	84,17	55,71	56,67
ρ <sub>w1</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	0,997333	0,997333	0,997333	0,997333
ρ <sub>w3</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	0,997333	0,997333	0,997333	0,997333
ρ <sub>s</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	2,659049	2,638822	2,634799	2,656831
ρ <sub>s</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	2,65		2,65	

**Estimativa do valor da massa volúmica da areia argilosa**

Tendo por base o diagrama de fases de um solo, é possível relacionar a massa volúmica da areia argilosa com as massas volúmicas dos solos utilizados na sua composição:

Tabela A1. 2 - Estimativa do valor da massa volúmica

solo	areia	argila	A1.1
$\rho_s = \frac{W_s}{V_s}$	$\rho_{s,a} = \frac{W_{s,a}}{V_{s,a}}$	$\rho_{s,c} = \frac{W_{s,c}}{V_{s,c}}$	
$\%a + \%c = 1$ $W_s = W_{s,a} + W_{s,c}$ $V_s = V_{s,a} + V_{s,c}$	$W_{s,a} = \%a * W_s$ $(\%a = 0,7)$	$W_{s,c} = \%c * W_s$ $(\%c = 0,3)$	

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_{s,a} + W_{s,c}}{V_{s,a} + V_{s,c}} = \frac{W_{s,a} + W_{s,c}}{\frac{W_{s,a}}{\rho_{s,a}} + \frac{W_{s,c}}{\rho_{s,c}}} = \frac{\%a \cdot W_s + \%c \cdot W_s}{\frac{\%a \cdot W_s}{\rho_{s,a}} + \frac{\%c \cdot W_s}{\rho_{s,c}}} =$$

$$= \frac{(\%a + \%c) \cdot \rho_{s,a} \rho_{s,c}}{\%a \cdot \rho_{s,c} + \%c \cdot \rho_{s,a}} = \frac{\rho_{s,a} \rho_{s,c}}{\%a \cdot \rho_{s,c} + \%c \cdot \rho_{s,a}} = \frac{1}{\frac{\%a}{\rho_{s,a}} + \frac{\%c}{\rho_{s,c}}} = 2,65$$

## A1.2 - Análise Granulométrica

A determinação da composição granulométrica da areia e da argila a partir da análise com COULTER LS200, que procede à análise granulométrica por difração laser com uma gama de medição entre 0,4  $\mu\text{m}$  e 2 mm. As amostras não sofreram qualquer tratamento prévio (dispersão química ou mecânica). Procedeu-se a quatro medições sucessivas de cada amostra, de modo a verificar a estabilidade dos resultados. O tempo de análise adotado foi de 60s. Na análise foi utilizado o modelo de Fraunhofer, pré-programado no sistema de aquisição de dados. As Tabelas seguintes apresentam os valores médios da percentagem de acumulados para cada solo, em relação ao volume de cada provete.

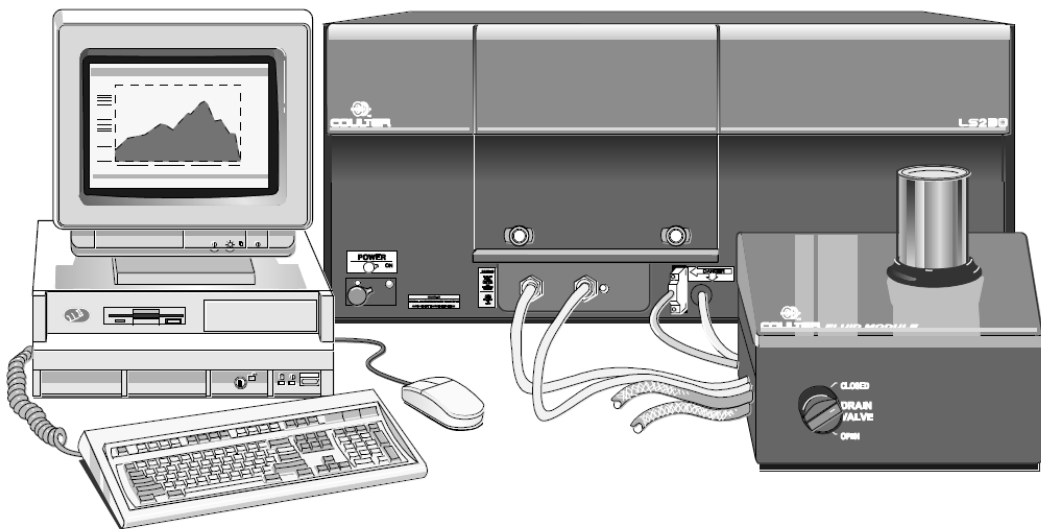


Figura A1. 1 - Desenho esquemático do equipamento COULTER LS200 - Variable Speed Fluid Module Plus (Beckman Coulter Inc., 2011)

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A1. 3 - Análise granulométrica da areia

Areia		
Diâmetro da partícula (µm)	Volume diferencial (%)	Acumulados (%)
111	0	-0,0767
121,8	0,00042	-0,0767
133,7	0,0081	-0,07628
146,8	0,043	-0,06818
161,2	0,13	-0,02518
176,9	0,24	0,10482
194,2	0,37	0,34482
213,2	0,6	0,71482
234	1,09	1,31482
256,9	3,36	2,40482
282,1	6,85	5,76482
309,6	9,27	12,61482
339,9	11,6	21,88482
373,1	13,1	33,48482
409,6	12,8	46,58482
449,7	11,5	59,38482
493,6	8,16	70,88482
541,9	4,44	79,04482
594,8	4,86	83,48482
653	4	88,34482
716,8	0,88	92,34482
786,9	0,68	93,22482
863,9	0,83	93,90482
948,3	2,1	94,73482
1041	2,36	96,83482
1143	0,31	99,19482
1255	0,035	99,50482
1377	0,00018	99,53982
1512	0,28	99,54
1660	0,18	99,82
1822	0	100
2000	0	100

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A1. 4 - Análise granulométrica da argila

Argila		
Diâmetro da partícula (µm)	Volume diferencial (%)	Acumulados (%)
0,375	0,37	0,036
0,412	0,65	0,406
0,452	0,95	1,056
0,496	1,34	2,006
0,545	1,65	3,346
0,598	1,92	4,996
0,656	2,13	6,916
0,721	2,32	9,046
0,791	2,47	11,366
0,868	2,57	13,836
0,953	2,63	16,406
1,047	2,65	19,036
1,149	2,64	21,686
1,261	2,63	24,326
1,384	2,62	26,956
1,52	2,61	29,576
1,668	2,6	32,186
1,832	2,59	34,786
2,011	2,6	37,376
2,207	2,65	39,976
2,423	2,75	42,626
2,66	2,87	45,376
2,92	3	48,246
3,205	3,16	51,246
3,519	3,35	54,406
3,863	3,62	57,756
4,24	3,85	61,376
4,655	4	65,226
5,11	4	69,226
5,61	3,96	73,226
6,158	4,05	77,186
6,76	4,26	81,236
7,421	4,53	85,496
8,147	4,45	90,026
8,943	3,34	94,476
9,818	1,73	97,816
10,78	0,41	99,546
11,83	0,044	99,956
12,99	0	100

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A1. 5 - Cálculo da percentagem de acumulados da areia argilosa

Areia Argilosa	
Diâmetro da partícula ( $\mu\text{m}$ )	Acumulados (%)
0,375	-0,04289
0,412	0,06811
0,452	0,26311
0,496	0,54811
0,545	0,95011
0,598	1,44511
0,656	2,02111
0,721	2,66011
0,791	3,35611
0,868	4,09711
0,953	4,86811
1,047	5,65711
1,149	6,45211
1,261	7,24411
1,384	8,03311
1,52	8,81911
1,668	9,60211
1,832	10,38211
2,011	11,15911
2,207	11,93911
2,423	12,73411
2,66	13,55911
2,92	14,42011
3,205	15,32011
3,519	16,26811
3,863	17,27311
4,24	18,35911
4,655	19,51411
5,11	20,71411
5,61	21,91411
6,158	23,10211
6,76	24,31711
7,421	25,59511
8,147	26,95411
8,943	28,28911
9,818	29,29111
10,78	29,81011
11,83	29,93311
12,99	29,94631
14,26	29,94631
15,65	29,94631
17,18	29,94631
18,86	29,94631
20,71	29,94631
22,73	29,94631
24,95	29,94631

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A1. 6 - Cálculo da percentagem de acumulados da areia argilosa (continuação)

Areia Argilosa	
Diâmetro da partícula (µm)	Acumulados (%)
27,39	29,94631
30,07	29,94631
33,01	29,94631
36,24	29,94631
39,78	29,94631
43,67	29,94631
47,94	29,94631
52,62	29,94631
57,77	29,94631
63,41	29,94631
69,61	29,94631
76,42	29,94631
83,89	29,94631
92,09	29,94631
101,1	29,94631
111	29,94631
121,8	29,94631
133,7	29,946604
146,8	29,952274
161,2	29,982374
176,9	30,073374
194,2	30,241374
213,2	30,500374
234	30,920374
256,9	31,683374
282,1	34,035374
309,6	38,830374
339,9	45,319374
373,1	53,439374
409,6	62,609374
449,7	71,569374
493,6	79,619374
541,9	85,331374
594,8	88,439374
653	91,841374
716,8	94,641374
786,9	95,257374
863,9	95,733374
948,3	96,314374
1041	97,784374
1143	99,436374
1255	99,653374
1377	99,677874
1512	99,678
1660	99,874
1822	100
2000	100

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

A percentagem de acumulados da areia argilosa foi calculada através da seguinte relação:

$$\text{Acumulados areia argilosa (\%)} = 0,7 * \text{acumulados areia} + 0,3 * \text{acumulados argila}$$

A Figura A1.2 mostra a curva granulométrica da areia argilosa, assim como as curvas granulométricas dos solos utilizados na sua composição. A Tabela A1.7 apresenta as frações granulométricas da areia argilosa.

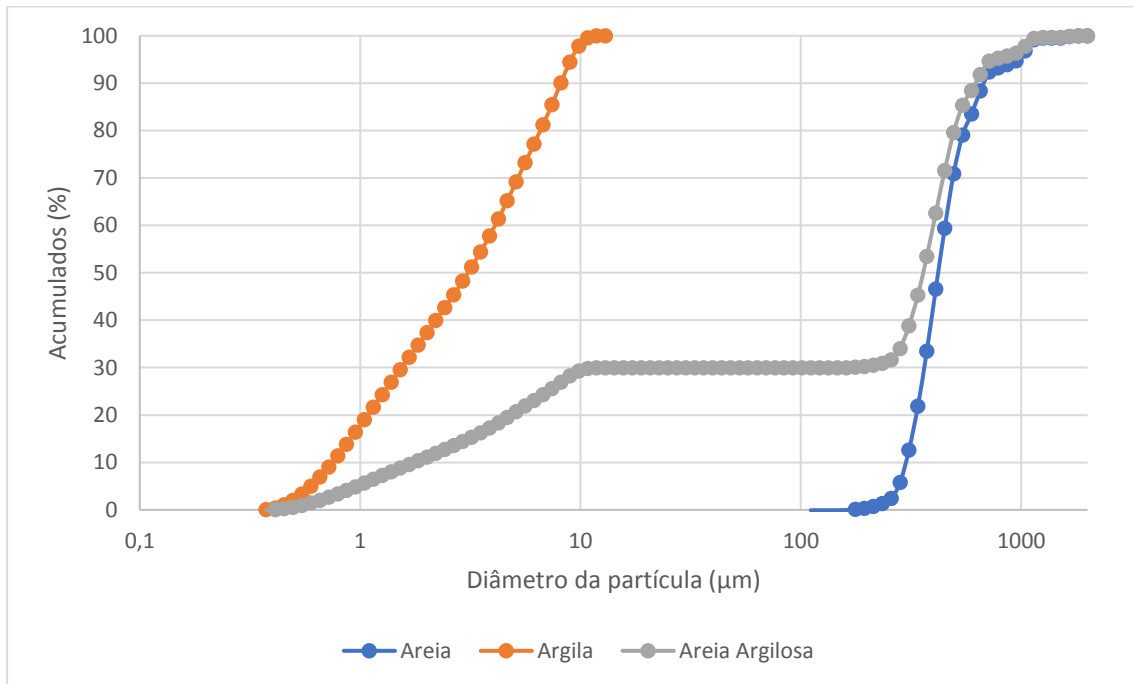


Figura A1. 2 - Curvas granulométricas de areia, argila e areia argilosa

Tabela A1. 7 - Frações granulométricas da areia argilosa

Fração granular	
% argila	11
% silte	19
% areia	70



### **A1.3 - Determinação do limite de liquidez e de plasticidade do solo**

#### **Termos e Definições**

O limite de liquidez ( $\omega_L$ ) é empiricamente estabelecido pelo teor em água mínimo para o qual o solo flui sob uma pequena, mas especificada força perturbadora (o solo deixa de ter resistência ao corte). A força perturbadora é definida pelas condições do ensaio.

O limite de plasticidade ( $\omega_P$ ) é empiricamente estabelecido pelo menor teor em água para o qual o solo exhibe consistência plástica.

#### **Procedimentos**

Os limites de consistência da areia argilosa foram determinados seguindo os procedimentos experimentais da norma ISO/TS 17892-12:2004 (ISO/TS 17892-12, 2004). A amostra foi preparada com água destilada e permaneceu em repouso cerca de 24h antes de se proceder à determinação dos limites de consistência.

#### **Registos e resultados dos ensaios**

A Tabela A1.76 reúne os dados de medição e cálculos decorrentes do ensaio de determinação do limite de liquidez do solo pelo método do cone penetrómetro. Traçou-se uma curva relacionando o teor em água com a correspondente penetração do cone, como mostra a Figura A1.3. O limite de liquidez da amostra ensaiada é dado pelo teor em água correspondente a uma penetração de 20mm. A Tabela A1.8 apresenta os dados de medição e o cálculo do limite de plasticidade do solo pelo método dos rolinhos.

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A1. 8 - Resultados dos ensaios de determinação do limite de liquidez

	0		1		2		3		4		5	
P <sub>inicial</sub> (mm)	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
P <sub>final</sub> (mm)	12,76	13,18	14,34	14,26	16,89	16,85	20,24	19,76	22,49	22,8	25,54	26,04
P <sub>i</sub> (mm)	12,07	12,49	13,65	13,57	16,2	16,16	19,55	19,07	21,8	22,11	24,85	25,35
ΔP (mm)	0,42		0,08		0,04		0,48		0,31		0,5	
P (mm)	12,28		13,61		16,18		19,31		21,955		25,1	
Nº cáp.	117		102		107		114		116		109	134
m <sub>1</sub> (g)	12,26		12,24		12,21		12,33		12,33		12,37	12,34
m <sub>2</sub> (g)	25,58		22,34		26,23		25,67		27,27		27,67	29,02
m <sub>3</sub> (g)	23,44		20,68		23,82		23,32		24,56		24,74	25,84
ω (%)	19,1		19,7		20,8		21,4		22,2		23,6	
ω <sub>L</sub> (%)	22											

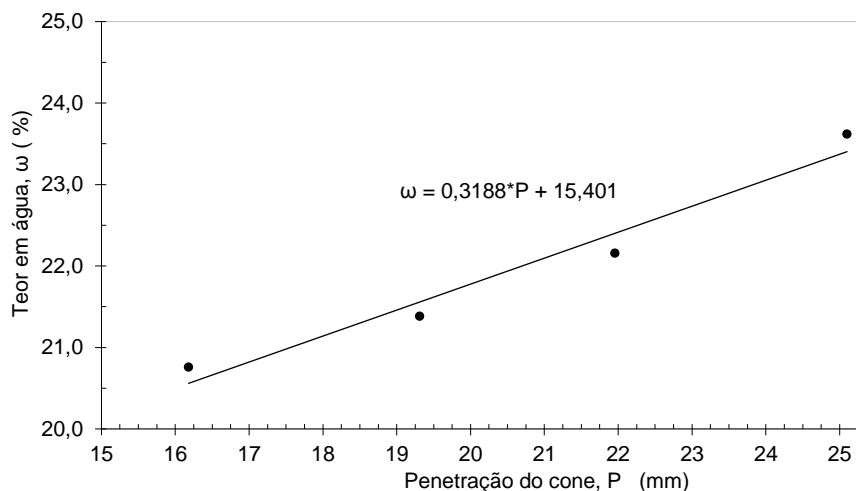


Figura A1. 3 - Relação entre o teor em água e a respetiva penetração do cone

Tabela A1. 9 - Resultado do ensaio de determinação do limite de liquidez

Nº cáp.	168	166
m <sub>1</sub> (g)	22,68	22,6
m <sub>2</sub> (g)	33,29	28,28
m <sub>3</sub> (g)	32,04	27,63
ω (%)	13,4	12,9
Δω (%)	0,4	
ω <sub>p</sub> (%)	13	

## Anexo 2 - Ensaio Laboratoriais

Neste anexo são apresentados os dados de medição relativos aos ensaios descritos na secção 3.4, assim como todos os resultados obtidos.

### A2.1 - Ensaio *Fall Cone*

Tabela A2. 1 - Penetração do cone após 1 s

Penetração aos 1s								
	1 (0%)		2 (0,05%)			3 (0,1%)		
P <sub>i</sub> (mm)	-	-	0,49	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57
P <sub>f</sub> (mm)	-	-	21,62	21,66	22,16	14,85	14,75	15,10
P (mm)	-	-	21,13	21,11	21,61	14,29	14,19	14,53
P <sub>médio</sub> (mm)	-		21,28333333			14,33666667		

Tabela A2. 2 - Penetração do cone após 2 s

Penetração aos 2s								
	1 (0%)		2 (0,05%)			3 (0,1%)		
P <sub>i</sub> (mm)	-	-	0,49	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57
P <sub>f</sub> (mm)	-	-	22,32	22,44	22,47	14,85	14,75	15,10
P (mm)	-	-	21,83	21,89	21,92	14,29	14,19	14,53
P <sub>médio</sub> (mm)	-		21,88			14,33666667		

Tabela A2. 3 - Penetração do cone após 3 s

Penetração aos 3s								
	1 (0%)		2 (0,05%)			3 (0,1%)		
P <sub>i</sub> (mm)	-	-	0,49	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57
P <sub>f</sub> (mm)	-	-	22,73	22,66	22,87	14,85	14,75	15,10
P (mm)	-	-	22,24	22,11	22,32	14,29	14,19	14,53
P <sub>médio</sub> (mm)	-		22,22333333			14,33666667		

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 4 - Penetração do cone após 4 s

Penetração aos 4s								
	1 (0%)		2 (0,05%)			3 (0,1%)		
P <sub>i</sub> (mm)	-	-	0,49	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57
P <sub>f</sub> (mm)	-	-	23,13	22,99	23,07	14,85	14,75	15,10
P (mm)	-	-	22,64	22,44	22,52	14,29	14,19	14,53
P <sub>médio</sub> (mm)	-		22,53333333			14,33666667		

Tabela A2. 5 - Penetração do cone após 5 s

Penetração aos 5s								
	1 (0%)		2 (0,05%)			3 (0,1%)		
P <sub>i</sub> (mm)	-	-	0,49	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57
P <sub>f</sub> (mm)	-	-	23,33	23,21	23,17	14,85	14,75	15,10
P (mm)	-	-	22,84	22,66	22,62	14,29	14,19	14,53
P <sub>médio</sub> (mm)	-		22,71			14,34		

Tabela A2. 6 - Teor em água

Cáp. N°	117	114	120
m <sub>1</sub> (g)	12,28	12,33	12,23
m <sub>2</sub> (g)	29,09	37,31	31,43
m <sub>3</sub> (g)	26,01	32,92	28,01
ω (%)	22,433	21,321	21,673
I <sub>c</sub> (-)	-0,08	0,05	0,01

## A2.2 - Ensaio *Vane Test*

Tabela A2. 7 - - Ensaio *Vane Test* para a amostra com 0% de biopolímero

Amostra 0 %			
	$\Delta\theta$		
$\theta$ (°)	1	2	3
0	0	0	0
5	0	0	0
10	0	0	0
15	0	0	0
20	0	0	0
25	0	0	0
30	0	0	0
35	0	0	0
40	0	0	0
45	0	0	0
50	0	0	0
55	0	0	0
60	0	0	0
65	0	0	0
70	0	0	0
75	0	0	0
80	0	0	0
85	0	0	0
90	0	0	0
100	0	0	0
110	0	0	0
120	0	0	0
130	0	0	0
140	0	0	0
150	0	0	0
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 8 - Ensaio Vane Test para a amostra com 0,05% de biopolímero

Amostra 0,05 %			
$\theta$ (°)	$\Delta\theta$		
	1	2	3
0	0	0	0
5	4	4	3
10	6	6	5
15	8	8	7
20	9	9	8
25	11	10	9
30	13	11	12
35	13	12	12
40	13	12	12
45	14	13	12
50	14	13	12
55	14	13	12
60	14	13	12
65	14	13	12
70	14	13	12
75	14	13	12
80	14	13	12
85	14	15	11
90	14	15	11
100	14	15	11
110	14	15	11
120	14	15	11
130	14	15	11
140	14	15	11
150	14	15	11
160	14	15	11
170	14	15	11
180	14	15	11

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 9 - Ensaio Vane Test para a amostra com 0,1% de biopolímero

Amostra 0,1 %			
$\theta$ (°)	$\Delta\theta$		
	1	2	3
0	0	0	0
5	0	1	0
10	1	1	0
15	2	3	2
20	6	6	5
25	8	10	8
30	10	13	10
35	12	15	13
40	13	17	13
45	15	18	15
50	16	20	16
55	17	22	17
60	18	23	17
65	18	23	17
70	18	23	17
75	18	23	17
80	18	24	17
85	18	24	17
90	18	24	17
100	17	23	17
110	16	23	16
120	15	20	15
130	13	20	15
140	13	18	15
150	12	18	15
160	12	17	15
170	12	16	14
180	10	16	14

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Após a realização dos ensaios *Vane Test* sobre as três amostras do solo em estudo procedeu-se à determinação do momento torsor aplicado ao molinete, mediante a curva de calibração da mola utilizada durante os ensaios (não houve necessidade de utilizar as molas mais rígidas). A partir da tabela de calibração da mola (Tabela A2.10), obteve-se a equação da reta de calibração (Figura A2.1).

Tabela A2. 10 - Valores de torque e conseqüente deflexão da mola 4

Torque (N.m)	Deflexão mola 4 (graus)
0,025	16,5
0,049	33
0,074	49
0,098	66
0,123	82
0,147	99
0,172	116
0,196	133
0,221	150
0,245	166,5
0,27	183

Com os valores da Tabela A2.10, obteve-se a sua equação da reta ou reta de calibração.

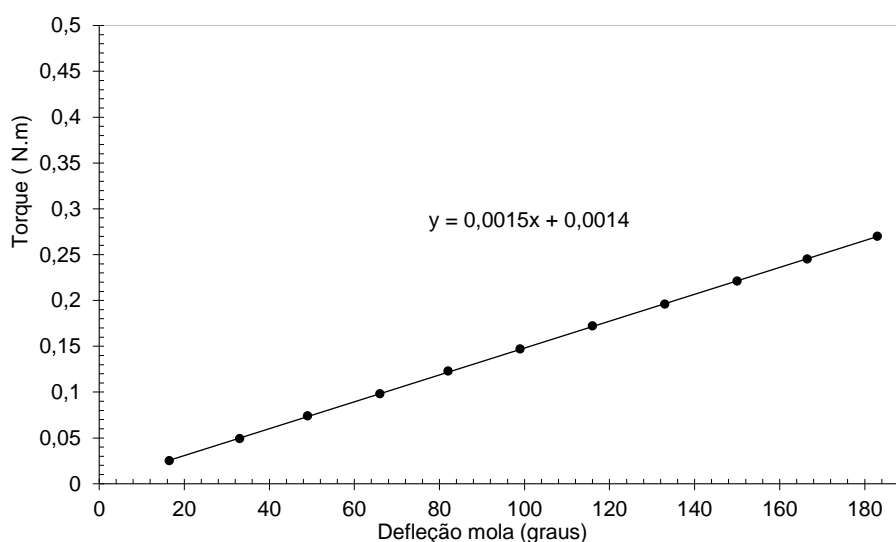


Figura A2. 2 - Reta de calibração



## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Com a reta de calibração calculada, seguiu-se o cálculo do torque (T) e da respectiva resistência ao corte não drenado ( $\tau$ ) para cada uma das amostras de solo. O torque foi calculado através da equação da reta, substituindo em x o valor de  $\Delta\theta$  obtido nos ensaios laboratoriais. Os valores do torque e da resistência ao corte não drenado são apresentados nas Tabelas A2.11 e A2.12.

*Tabela A2. 11 - Valores de torque e da resistência ao corte não drenado para a amostra com 0,05% de biopolímero*

Amostra 0,05%									
$\theta$ (°)	1	T (N.m)	$\tau$ (kPa)	2	T (N.m)	$\tau$ (kPa)	3	T (N.m)	$\tau$ (kPa)
0	0	0,0014	0,19	0	0,0014	0,19	0	0,0014	0,19
5	4	0,0074	0,99	4	0,0074	0,99	3	0,0059	0,79
10	6	0,0104	1,39	6	0,0104	1,39	5	0,0089	1,19
15	8	0,0134	1,78	8	0,0134	1,78	7	0,0119	1,59
20	9	0,0149	1,98	9	0,0149	1,98	8	0,0134	1,78
25	11	0,0179	2,38	10	0,0164	2,18	9	0,0149	1,98
30	13	0,0209	2,78	11	0,0179	2,38	12	0,0194	2,58
35	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58	12	0,0194	2,58
40	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58	12	0,0194	2,58
45	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
50	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
55	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
60	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
65	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
70	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
75	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
80	14	0,0224	2,98	13	0,0209	2,78	12	0,0194	2,58
85	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
90	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
100	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
110	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
120	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
130	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
140	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
150	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
160	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
170	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38
180	14	0,0224	2,98	15	0,0239	3,18	11	0,0179	2,38

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 12 - Valores de torque e da resistência ao corte não drenado para a amostra com 0,1% de biopolímero

Amostra 0,1%									
$\theta$ (°)	1	T (N.m)	$\tau$ (kPa)	2	T (N.m)	$\tau$ (kPa)	3	T (N.m)	$\tau$ (kPa)
0	0	0,0014	0,19	0	0,0014	0,19	0	0,0014	0,19
5	0	0,0014	0,19	1	0,0029	0,39	0	0,0014	0,19
10	1	0,0029	0,39	1	0,0029	0,39	0	0,0014	0,19
15	2	0,0044	0,59	3	0,0059	0,79	2	0,0044	0,59
20	6	0,0104	1,39	6	0,0104	1,39	5	0,0089	1,19
25	8	0,0134	1,78	10	0,0164	2,18	8	0,0134	1,78
30	10	0,0164	2,18	13	0,0209	2,78	10	0,0164	2,18
35	12	0,0194	2,58	15	0,0239	3,18	13	0,0209	2,78
40	13	0,0209	2,78	17	0,0269	3,58	13	0,0209	2,78
45	15	0,0239	3,18	18	0,0284	3,78	15	0,0239	3,18
50	16	0,0254	3,38	20	0,0314	4,18	16	0,0254	3,38
55	17	0,0269	3,58	22	0,0344	4,58	17	0,0269	3,58
60	18	0,0284	3,78	23	0,0359	4,78	17	0,0269	3,58
65	18	0,0284	3,78	23	0,0359	4,78	17	0,0269	3,58
70	18	0,0284	3,78	23	0,0359	4,78	17	0,0269	3,58
75	18	0,0284	3,78	23	0,0359	4,78	17	0,0269	3,58
80	18	0,0284	3,78	24	0,0374	4,98	17	0,0269	3,58
85	18	0,0284	3,78	24	0,0374	4,98	17	0,0269	3,58
90	18	0,0284	3,78	24	0,0374	4,98	17	0,0269	3,58
100	17	0,0269	3,58	23	0,0359	4,78	17	0,0269	3,58
110	16	0,0254	3,38	23	0,0359	4,78	16	0,0254	3,38
120	15	0,0239	3,18	20	0,0314	4,18	15	0,0239	3,18
130	13	0,0209	2,78	20	0,0314	4,18	15	0,0239	3,18
140	13	0,0209	2,78	18	0,0284	3,78	15	0,0239	3,18
150	12	0,0194	2,58	18	0,0284	3,78	15	0,0239	3,18
160	12	0,0194	2,58	17	0,0269	3,58	15	0,0239	3,18
170	12	0,0194	2,58	16	0,0254	3,38	14	0,0224	2,98
180	10	0,0164	2,18	16	0,0254	3,38	14	0,0224	2,98

## A2.3 - Ensaio Edométrico com permeabilidade

### Solo com 0% de biopolímero

Tabela A2. 13 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra de controlo

10,60 g			
0,1	1378,6	13,786	0
1	1378,8	13,788	-0,002
7	1378,9	13,789	-0,003
13	1374,7	13,747	0,039
25	1373,8	13,738	0,048
49	1373	13,73	0,056
61	1372,8	13,728	0,058
121	1371,5	13,715	0,071
241	1369,8	13,698	0,088
481	1367,3	13,673	0,113
601	1366,2	13,662	0,124
1201	1363,1	13,631	0,155
2401	1361,3	13,613	0,173
4801	1360,2	13,602	0,184
6001	1360,1	13,601	0,185

30,00 g			
0,1	1354,8	13,548	0
1	1354,6	13,546	0,002
7	1354,1	13,541	0,007
13	1354,1	13,541	0,007
25	1353,8	13,538	0,01
49	1353,5	13,535	0,013
61	1353,4	13,534	0,014
121	1353,1	13,531	0,017
241	1352,4	13,524	0,024
481	1351,8	13,518	0,03
601	1351,6	13,516	0,032
1201	1350,9	13,509	0,039
2401	1350,8	13,508	0,04
4801	1350,8	13,508	0,04
6001	1350,7	13,507	0,041

50,50 g			
0,1	1350,3	13,503	0
1	1350,1	13,501	0,002
7	1350,4	13,504	-0,001
13	1348,8	13,488	0,015
25	1348,1	13,481	0,022
49	1347,7	13,477	0,026
61	1347,7	13,477	0,026
121	1347,3	13,473	0,03
241	1347	13,47	0,033
481	1346,8	13,468	0,035
601	1346,8	13,468	0,035
1201	1346,6	13,466	0,037
2401	1346,3	13,463	0,04
4801	1346,3	13,463	0,04
6001	1346,3	13,463	0,04

101,60 g			
0,1	1341,4	13,414	0
1	1341,4	13,414	0
7	1340,4	13,404	0,01
13	1330,4	13,304	0,11
25	1328,2	13,282	0,132
49	1326,4	13,264	0,15
61	1325,9	13,259	0,155
121	1323,4	13,234	0,18
241	1320,8	13,208	0,206
481	1318,9	13,189	0,225
601	1318,4	13,184	0,23
1201	1314,5	13,145	0,269
2401	1313,6	13,136	0,278
4801	1313,4	13,134	0,28
6001	1313,4	13,134	0,28

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 14 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra de controle (continuação)

200,80 g			
0,1	1266,1	12,661	0
1	1266,3	12,663	-0,002
7	1266,3	12,663	-0,002
13	1266,3	12,663	-0,002
25	1266,1	12,661	0
49	1266,1	12,661	0
61	1266,3	12,663	-0,002
121	1266,3	12,663	-0,002
241	1266,3	12,663	-0,002
481	1266,3	12,663	-0,002
601	1266,3	12,663	-0,002
1201	1266,3	12,663	-0,002
2401	1266,1	12,661	0
4801	1266,3	12,663	-0,002
6001	1266,3	12,663	-0,002

500 g			
0,1	1242,1	12,421	0
1	1242	12,42	0,001
7	1240,2	12,402	0,019
13	1238,9	12,389	0,032
25	1236	12,36	0,061
49	1231,9	12,319	0,102
61	1230,1	12,301	0,12
121	1223,2	12,232	0,189
241	1215,8	12,158	0,263
481	1212,3	12,123	0,298
601	1211,6	12,116	0,305
1201	1209,7	12,097	0,324
2401	1208,5	12,085	0,336
4801	1207,4	12,074	0,347
6001	1207,1	12,071	0,35

-80,5g			
0,1	1211,3	12,113	0
1	1211,3	12,113	0
7	1211,3	12,113	0
13	1211,3	12,113	0
25	1211,3	12,113	0
49	1211,3	12,113	0
61	1211,5	12,115	-0,002
121	1211,5	12,115	-0,002
241	1211,6	12,116	-0,003
481	1211,6	12,116	-0,003
601	1211,5	12,115	-0,002
1201	1211,6	12,116	-0,003
2401	1211,7	12,117	-0,004
4801	1211,9	12,119	-0,006
6001	1211,9	12,119	-0,006

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Solo com 0,05% de biopolímero

Tabela A2. 15 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,05\%$

10,60 g			
0,1	1203	12,03	0
1	1203	12,03	0
7	1202,9	12,029	0,001
13	1202,9	12,029	0,001
25	1202,6	12,026	0,004
49	1202,1	12,021	0,009
61	1201,9	12,019	0,011
121	1201	12,01	0,02
241	1199,3	11,993	0,037
481	1197,7	11,977	0,053
601	1196,9	11,969	0,061
1201	1193,9	11,939	0,091
2401	1190,3	11,903	0,127
4801	1184,3	11,843	0,187
6001	1182,7	11,827	0,203
12001	1181,5	11,815	0,215
24001	1181,1	11,811	0,219

30,00 g			
0,1	1181,2	11,812	0
1	1181,2	11,812	0
7	1178,3	11,783	0,029
13	1177,4	11,774	0,038
25	1177	11,77	0,042
49	1176,6	11,766	0,046
61	1176,3	11,763	0,049
121	1175,7	11,757	0,055
241	1175,2	11,752	0,06
481	1174,4	11,744	0,068
601	1174,1	11,741	0,071
1201	1173,7	11,737	0,075
2401	1173,4	11,734	0,078
4801	1173,4	11,734	0,078
6001	1173,3	11,733	0,079
12001	1173,3	11,733	0,079
24001	1173,3	11,733	0,079

50,50 g			
0,1	1173	11,73	0
1	1173	11,73	0
7	1171,5	11,715	0,015
13	1171	11,71	0,02
25	1170,7	11,707	0,023
49	1170,3	11,703	0,027
61	1170	11,7	0,03
121	1169,6	11,696	0,034
241	1169,1	11,691	0,039
481	1168,1	11,681	0,049
601	1167,8	11,678	0,052
1201	1167	11,67	0,06
2401	1166,7	11,667	0,063
4801	1166,6	11,666	0,064
6001	1166,6	11,666	0,064

101,60 g			
0,1	1166,6	11,666	0
1	1166,6	11,666	0
7	1163,3	11,633	0,033
13	1161,7	11,617	0,049
25	1160,7	11,607	0,059
49	1160,2	11,602	0,064
61	1160,2	11,602	0,064
121	1159,7	11,597	0,069
241	1159,2	11,592	0,074
481	1159	11,59	0,076
601	1158,8	11,588	0,078
1201	1151,6	11,516	0,15
2401	1148,3	11,483	0,183
4801	1127,5	11,275	0,391
6001	1126,4	11,264	0,402
12001	1125,7	11,257	0,409
24001	1125,4	11,254	0,412
48001	1125,3	11,253	0,413

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 16 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,05\%$  (continuação)

200,80 g			
0,1	1122,2	11,222	0
1	1122,3	11,223	-0,001
7	1120	11,2	0,022
13	1118,6	11,186	0,036
25	1117,3	11,173	0,049
49	1115,6	11,156	0,066
61	1114,9	11,149	0,073
121	1112,1	11,121	0,101
241	1108,1	11,081	0,141
481	1102	11,02	0,202
601	1099	10,99	0,232
1201	1092,3	10,923	0,299
2401	1087,1	10,871	0,351
4801	1083,8	10,838	0,384
6001	1083,2	10,832	0,39
12001	1081,8	10,818	0,404
24001	1081	10,81	0,412
48001	1080,4	10,804	0,418

500 g			
0,1	1079,9	10,799	0
1	1080	10,8	-0,001
7	1074	10,74	0,059
13	1071,7	10,717	0,082
25	1069	10,69	0,109
49	1067,8	10,678	0,121
61	1063,9	10,639	0,16
121	1058,8	10,588	0,211
241	1052,5	10,525	0,274
481	1050,4	10,504	0,295
601	1046,4	10,464	0,335
1201	1044,2	10,442	0,357
2401	1042,9	10,429	0,37
4801	1042,5	10,425	0,374
6001	1041,7	10,417	0,382
12001	1041	10,41	0,389
24001	1040,4	10,404	0,395
48001	1039,9	10,399	0,4

1000 g			
0,1	1032,3	10,323	0
1	1032,3	10,323	0
7	1032,3	10,323	0
13	1029,7	10,297	0,026
25	1025,5	10,255	0,068
49	1022,6	10,226	0,097
61	1021,4	10,214	0,109
121	1017,3	10,173	0,15
241	1013,4	10,134	0,189
481	1010,4	10,104	0,219
601	1009,7	10,097	0,226
1201	1008,3	10,083	0,24
2401	1007,2	10,072	0,251
4801	1006,5	10,065	0,258
6001	1006,1	10,061	0,262
12001	1005,5	10,055	0,268

-1500g			
0,1	1004,9	10,049	0
1	1004,9	10,049	0
7	1009,3	10,093	-0,044
13	1009,4	10,094	-0,045
25	1009,1	10,091	-0,042
49	1009,1	10,091	-0,042
61	1009	10,09	-0,041
121	1009,1	10,091	-0,042
241	1009,1	10,091	-0,042
481	1009,1	10,091	-0,042
601	1009,1	10,091	-0,042
1201	1009,3	10,093	-0,044
2401	1009,3	10,093	-0,044
4801	1009,4	10,094	-0,045
6001	1009,4	10,094	-0,045
12001	1009,5	10,095	-0,046

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 17 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,05\%$  (continuação 2)

-302,4g			
0,1	1009,4	10,094	0
1	1009,5	10,095	-0,001
7	1010,5	10,105	-0,011
13	1010,6	10,106	-0,012
25	1010,9	10,109	-0,015
49	1011,2	10,112	-0,018
61	1011,2	10,112	-0,018
121	1011,3	10,113	-0,019
241	1011,5	10,115	-0,021
481	1011,6	10,116	-0,022
601	1011,7	10,117	-0,023
1201	1011,9	10,119	-0,025
2401	1012	10,12	-0,026
4801	1012	10,12	-0,026
6001	1012	10,12	-0,026

-80,5g			
0,1	1012,1	10,121	0
1	1012,3	10,123	-0,002
7	1012,5	10,125	-0,004
13	1012,7	10,127	-0,006
25	1013	10,13	-0,009
49	1013,1	10,131	-0,01
61	1013,1	10,131	-0,01
121	1013,2	10,132	-0,011
241	1013,5	10,135	-0,014
481	1013,5	10,135	-0,014
601	1013,6	10,136	-0,015
1201	1013,8	10,138	-0,017
2401	1014	10,14	-0,019
4801	1014,2	10,142	-0,021
6001	1014,2	10,142	-0,021
12001	1014,3	10,143	-0,022

Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

**Solo com 0,1% de biopolímero**

Tabela A2. 18 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,1\%$

10,60 g			
0,1	1222,9	12,229	0
1	1222,9	12,229	0
7	1222,9	12,229	0
13	1222,9	12,229	0
25	1222,8	12,228	0,001
49	1222,6	12,226	0,003
61	1222,6	12,226	0,003
121	1222,4	12,224	0,005
241	1221,8	12,218	0,011
481	1220,7	12,207	0,022
601	1220,2	12,202	0,027
1201	1218,3	12,183	0,046
2401	1215,1	12,151	0,078
4801	1212,1	12,121	0,108
6001	1210,8	12,108	0,121
12001	1205,3	12,053	0,176
24001	1201,5	12,015	0,214

30,00 g			
0,1	1201	12,01	0
1	1201	12,01	0
7	1200,1	12,001	0,009
13	1199,9	11,999	0,011
25	1199,9	11,999	0,011
49	1199,9	11,999	0,011
61	1199,6	11,996	0,014
121	1199,5	11,995	0,015
241	1199,2	11,992	0,018
481	1198,9	11,989	0,021
601	1198,6	11,986	0,024
1201	1198,1	11,981	0,029
2401	1197,4	11,974	0,036
4801	1196,1	11,961	0,049
6001	1195,6	11,956	0,054
12001	1194,7	11,947	0,063
24001	1187,3	11,873	0,137

50,50 g			
0,1	1187,1	11,871	0
1	1187,1	11,871	0
7	1185,4	11,854	0,017
13	1185,1	11,851	0,02
25	1184,9	11,849	0,022
49	1184,6	11,846	0,025
61	1184,5	11,845	0,026
121	1183,9	11,839	0,032
241	1183,1	11,831	0,04
481	1182,3	11,823	0,048
601	1181,9	11,819	0,052
1201	1180,9	11,809	0,062
2401	1180,2	11,802	0,069
4801	1179,2	11,792	0,079
6001	1178,9	11,789	0,082
12001	1172,3	11,723	0,148
24001	1169,2	11,692	0,179
48001	1168,7	11,687	0,184

101,60 g			
0,1	1168,5	11,685	0
1	1168,7	11,687	-0,002
7	1167,7	11,677	0,008
13	1167,6	11,676	0,009
25	1167,4	11,674	0,011
49	1167,3	11,673	0,012
61	1167,2	11,672	0,013
121	1167	11,67	0,015
241	1166,9	11,669	0,016
481	1166,5	11,665	0,02
601	1166,5	11,665	0,02
1201	1166,1	11,661	0,024
2401	1164	11,64	0,045
4801	1154,3	11,543	0,142
6001	1154,1	11,541	0,144
12001	1153,7	11,537	0,148



Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 19 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,1\%$  (continuação)

200,80 g			
0,1	1152	11,52	0
1	1151,9	11,519	0,001
7	1150,1	11,501	0,019
13	1149,4	11,494	0,026
25	1148,6	11,486	0,034
49	1147,1	11,471	0,049
61	1146,4	11,464	0,056
121	1144,4	11,444	0,076
241	1141,9	11,419	0,101
481	1139,2	11,392	0,128
601	1138,4	11,384	0,136
1201	1134,6	11,346	0,174
2401	1130,9	11,309	0,211
4801	1129,3	11,293	0,227
6001	1129,1	11,291	0,229
12001	1128,7	11,287	0,233

500 g			
0,1	1128,6	11,286	0
1	1128,6	11,286	0
7	1125,3	11,253	0,033
13	1123,7	11,237	0,049
25	1122,8	11,228	0,058
49	1120,8	11,208	0,078
61	1120,7	11,207	0,079
121	1120	11,2	0,086
241	1119,4	11,194	0,092
481	1119,2	11,192	0,094
601	1119,2	11,192	0,094
1201	1118,9	11,189	0,097
2401	1118,8	11,188	0,098
4801	1118,8	11,188	0,098
6001	1118,5	11,185	0,101

1000 g			
0,1	1118,1	11,181	0
1	1118,2	11,182	-0,001
7	1118,2	11,182	-0,001
13	1113,8	11,138	0,043
25	1113,4	11,134	0,047
49	1112,9	11,129	0,052
61	1112,8	11,128	0,053
121	1112,3	11,123	0,058
241	1111,9	11,119	0,062
481	1111,5	11,115	0,066
601	1111,4	11,114	0,067
1201	1111,3	11,113	0,068
2401	1111,1	11,111	0,07
4801	1111	11,11	0,071
6001	1110,8	11,108	0,073
12001	1110,8	11,108	0,073
24001	1110,7	11,107	0,074

-1500g			
0,1	1110,4	11,104	0
1	1110,6	11,106	-0,002
7	1114,7	11,147	-0,043
13	1114,1	11,141	-0,037
25	1114,1	11,141	-0,037
49	1114,1	11,141	-0,037
61	1114,1	11,141	-0,037
121	1114,3	11,143	-0,039
241	1114,1	11,141	-0,037
481	1114,1	11,141	-0,037
601	1114,1	11,141	-0,037
1201	1114,3	11,143	-0,039
2401	1114,1	11,141	-0,037
4801	1114,3	11,143	-0,039
6001	1114,1	11,141	-0,037
12001	1114,1	11,141	-0,037
24001	1114,3	11,143	-0,039
48001	1114,4	11,144	-0,04

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 20 - Dados de medição obtidos nos sucessivos escalões de carga para a amostra com  $\epsilon=0,1\%$  (continuação 2)

-302,4g				-80,5g			
0,1	1114,1	11,141	0	0,1	1115,2	11,152	0
1	1114,1	11,141	0	1	1115,2	11,152	0
7	1115,1	11,151	-0,01	7	1116,6	11,166	-0,014
13	1115,1	11,151	-0,01	13	1116,6	11,166	-0,014
25	1115,2	11,152	-0,011	25	1116,7	11,167	-0,015
49	1115,1	11,151	-0,01	49	1117	11,17	-0,018
61	1115,1	11,151	-0,01	61	1117	11,17	-0,018
121	1115,2	11,152	-0,011	121	1117,1	11,171	-0,019
241	1115,2	11,152	-0,011	241	1117,4	11,174	-0,022
481	1115,2	11,152	-0,011	481	1117,5	11,175	-0,023
601	1115,2	11,152	-0,011	601	1117,7	11,177	-0,025
1201	1115,2	11,152	-0,011	1201	1117,9	11,179	-0,027
2401	1115,1	11,151	-0,01	2401	1118,2	11,182	-0,03
4801	1115,2	11,152	-0,011	4801	1118,1	11,181	-0,029
6001	1115,2	11,152	-0,011	6001	1118,1	11,181	-0,029
12001	1115,2	11,152	-0,011				

### Cálculo do índice de vazios das amostras

Tendo por base o diagrama de fases de um solo, o índice de vazios inicial das amostras pode ser estimado por meio da seguinte expressão, cuja dedução é bastante simples:

$$e_0 = \omega_0 \times G_s \quad \text{A2.1}$$

A variação do teor em água conduz necessariamente à variação do índice de vazios, com efeitos significativos nos diferentes aspetos do comportamento do solo. A relação entre essas variações, ocorridas em cada amostra submetida a carregamentos progressivos, pode ser expressa em termos da variação da altura da amostra ( $\Delta H$ ), cuja demonstração é feita a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta H = h_{v0} - h_{vf} \\ H_0 = h_s + h_{v0} \\ \Delta e = \frac{h_{v0}}{h_s} - \frac{h_{vf}}{h_s} = \frac{\Delta H}{h_s} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} - \\ \frac{H_0}{h_s} = 1 + e_0 \Leftrightarrow \Delta e = \frac{\Delta H}{H_0} \times (1 + e_0) \\ h_s = \frac{\Delta H}{\Delta e} \end{array} \right. \quad \text{A2.1}$$

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Fazendo as correspondentes substituições, chegamos à relação entre a variação do teor em água e a variação do índice de vazios:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta e}{G_s} \quad \text{A2.3}$$

*Tabela A2. 21 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0% de biopolímero*

ÍNDICE DE VAZIOS			
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e$ total	e
1,0	0,185	0,014	0,534
2,5	0,279	0,022	0,526
5,0	0,323	0,025	0,523
10,1	0,652	0,050	0,498
20,1	1,123	0,087	0,461
45,1	1,715	0,133	0,415
95,1			
20,1			
5,0			
1,0	1,667	0,129	0,419

*Tabela A2. 22 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0,05% de biopolímero*

ÍNDICE DE VAZIOS			
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e$ total	e
1,0	0,219	0,017	0,553
2,5	0,297	0,023	0,547
5,0	0,364	0,029	0,542
10,1	0,777	0,061	0,509
20,1	1,226	0,096	0,474
45,1	1,631	0,128	0,442
95,1	1,975	0,155	0,415
20,1	1,935	0,152	0,418
5,0	1,91	0,150	0,420
1,0	1,887	0,148	0,422

## Efeito dos processos biológicos na estabilidade de taludes

Tabela A2. 23 - Cálculo do índice de vazios da amostra com 0,1% de biopolímero

ÍNDICE DE VAZIOS			
$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e$ total	e
1,0	0,214	0,017	0,528
2,5	0,356	0,027	0,517
5,0	0,542	0,042	0,502
10,1	0,692	0,053	0,491
20,1	0,942	0,073	0,471
45,1	1,044	0,081	0,463
95,1	1,122	0,087	0,457
20,1	1,085	0,084	0,460
5,0	1,077	0,083	0,461
1,0	1,048	0,081	0,463