U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS ATRAVÉS DAS BIOENZIMAS

AFONSO RODRIGUES CARRASCO DE OLIVEIRA COUTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO E TRANSPORTES

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família,

“A vida é um engano, um erro e um problema técnico, tudo ao mesmo tempo”

David Bruno

AGRADECIMENTOS

Findo este percurso da minha vida académica, são várias as pessoas que me acompanharam e deram o seu contributo para a conclusão deste trabalho que assinala o culminar de uma etapa essencial na minha formação.

Começo por agradecer ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro por todo o apoio, incentivo e orientação.

Endereço um enorme agradecimento ao Professor Doutor Agostinho Benta por toda a ajuda e conhecimentos transmitidos durante a realização deste trabalho.

Ao João Cruz e ao Rafael Marques, por toda a disponibilidade e pelo auxílio neste processo.

Aos meus pais pelo apoio incondicional durante toda esta etapa da minha vida e por serem um exemplo de dedicação e trabalho.

Ao Francisco, à Mafalda e à Shahida, por serem irmãos exemplares, estando sempre preocupados e dispostos a ajudar.

À Laurinda por todo o carinho.

À Inês, pela sua paciência, ajuda e preocupação.

Ao Filipe, ao Guilherme, ao Lucas, ao Zé e a toda a família e amigos que me acompanharam e apoiaram neste longo percurso.

RESUMO

Neste trabalho pretende-se estudar a influência das bioenzimas no processo de estabilização de solos. A metodologia escolhida promove a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO3) por via enzimática, misturando o solo com a bioenzima em estudo, seguindo uma série de procedimentos.

O tema das bioenzimas como estabilizadoras de solo é relativamente recente e bastante promissor, pois apresenta uma alternativa com menor impacte ambiental e economicamente rentável, quando comparada com as atuas técnicas de estabilização de solo.

O programa experimental foi dividido em duas fases. A primeira fase teve como objetivo a caracterização dos materiais usados, bem como a nossa solução estabilizadora. Na segunda fase dos trabalhos, procedeu-se à preparação de vários provetes dos solos 1 e 2 com duas concentrações diferentes do nosso produto e sem solução para controlo, permitindo assim a análise do efeito da bioestabilização. Disponibilizado numa fase tardia dos trabalhos, é também preparado um terceiro solo, com apenas uma única concentração.

Neste sentido, com o intuito de quantificar o comportamento mecânico dos provetes dos solos 1 e 2, foram realizados ensaios de compressão em prensa Marshall, os quais foram complementados com ensaios SEM (Scanning Electron Microscopes) para verificação das ligações químicas ocorridas no solo, bem como ensaios SDS- PAGE (Sodium Dodecyl Sulfate–Polyacrylamide Gel Electrophoresis) com o objetivo de avaliar o conteúdo proteico do nosso produto. No que diz respeito ao solo 3, foi realizado o ensaio CBR (California Bearing Ratio) para a perceção das propriedades mecânicas do solo.

Apesar da aplicação dos bioestabilizadores ser um processo relativamente simples, existem problemas que podem surgir no teste dos mesmos. Neste particular, destaca-se a dificuldade da aquisição de grandes quantidades de solo que cumpram as características exigidas pelos produtos.

Deste modo, através dos resultados experimentais, procura-se demonstrar e compreender a influência, quer mecânica quer química, das bioenzimas nos solos.

PALAVRAS-CHAVE: bioenzimas, bioestabilização, solos, CBR, Marshall

ABSTRACT

This project aims to study the influence of bioenzymes in the soil stabilization process. The chosen methodology promotes the precipitation of calcium carbonate (CaCO3) enzymatically, mixing the soil with the bioenzyme under study, following a set of procedures.

Although recent, the study of bioenzymes as soil stabilizers is quite promising as it presents an alternative with less environmental impact and better economical performance, when compared to current soil stabilization techniques.

The experimental program will be divided into two phases. The first phase will aim to characterize the materials used, as well as our stabilizing solution. In the second we will prepare several samples from soils 1 and 2, with two different concentrations of our product, and without a controlling solution, allowing us to analyze the effect of biostabilization. A third soil will also be prepared, acquired at a late stage of the project with a single concentration. To quantify the mechanical behavior of soil specimens 1 and 2, compression tests will be carried out in a Marshall press. This procedure will be complemented with SEM (Scanning Electron Microscopes) tests to verify the chemical bonds occurring in the soil, as well as the test SDS-PAGE (Sodium Dodecyl Sulfate–Polyacrylamide Gel Electrophoresis) to evaluate the protein content of our product. For soil 3, the CBR test will be applied to understand the mechanical properties.

Although the application of biostabilizers is a relatively simple process, there are problems that can arise when testing them. One of the main challenges is the difficulty of finding large amounts of soil that meet the characteristics required by the products.

Through the experimental results, we seek to demonstrate and understand the influence, whether mechanical or chemical, of bioenzymes on soils.

KEYWORDS: bioenzymes, biostabilization, soils, CBR, Marshall

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO 1

1.2. MATSWAY 2

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO 3

2.1.1. OBJETIVO 3

2.1.2. INTERAÇÃO ARGILA – ÁGUA 3

2.1.3. TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO – TRADICIONAL VS NÃO TRADICIONAL 4

2.2. ESTABILIZADORES TRADICIONAIS 5

2.2.1. SOLO-CAL 5

2.2.2. SOLO-CIMENTO 5

2.2.3. EMULSÃO BETUMINOSA 6

2.3. BIOESTABILIZAÇÃO E O SEU PROCESSO QUÍMICO 6

2.3.1. PRECIPITAÇÃO DE $CACO_3$ POR VIA BACTERIANA (MICP) 6

2.3.2. PRECIPITAÇÃO DE $CACO_3$ POR VIA ENZIMÁTICA (EICP) 7

2.3.3. PRODUÇÃO DA ENZIMA *UREASE* 7

2.4. BIOENZIMAS 8

2.4.1. ORIGEM DAS BIOENZIMAS 8

2.4.2. MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DAS BIOENZIMAS COMO ESTABILIZADORES 9

2.5. PRINCIPAIS PRODUTOS COMERCIALIZADOS E TESTES REALIZADOS 10

2.5.1. PRODUTOS COMERCIALIZADOS 10

2.5.2. PREÇOS DE APLICAÇÃO DAS BIOENZIMAS VS SOLO DE EMPRÉSTIMO 11

2.6. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS 12

2.6.1. EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS 12

2.6.2. EXPERIÊNCIAS NACIONAIS 14

3. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E DA BIOENZIMA GST 17

3.1. INTRODUÇÃO 17

3.2. SOLOS UTILIZADOS 17

3.2.1. SOLO 1 18

3.2.1.1. Análise granulométrica 19

3.2.1.2. Limites de consistência 21

3.2.1.3. Teor ótimo de humidade 21

3.2.1.4. CBR - California Bearing Ratio 22

3.2.2. SOLO 2 23

3.2.2.1. Análise granulométrica 23

3.2.2.2. Limites de consistência 24

3.2.2.3. Teor ótimo de humidade 25

3.2.2.4. CBR - California Bearing Ratio 25

3.2.3. SOLO 3 26

3.2.3.1. Análise granulométrica 26

3.2.3.2. Limites de consistência 27

3.2.3.3. Teor ótimo de humidade 27

3.2.3.4. CBR - California Bearing Ratio 27

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA BIOENZIMA UTILIZADA 28

3.3.1. REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA O USO DA BIOENZIMA 28

3.3.2. MODO DE APLICAÇÃO DA BIOENZIMA 29

3.3.2.1. Teste de solo 29

3.3.2.2. Quantidade de produto a ser diluído 29

3.3.2.3. Aplicação da bioenzima no solo 29

3.3.2.4. Outras aplicações do produto 30

3.4. COMPATIBILIDADE ENTRE OS SOLOS E O PRODUTO 30

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 33

4.1. INTRODUÇÃO 33

4.2. SOLO 1 E 2 33

4.2.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES 33

4.2.1.1. Equipamento utilizado 33
4.2.1.2. Preparação das soluções estabilizadoras 34
4.2.1.3. Montagem dos provetes de solo 35
4.2.2. ENSAIOS REALIZADOS 36
4.2.2.1. Ensaio de compressão em prensa Marshall 36
4.2.2.2. Ensaios SEM (Scanning Electron Microscopes) 38
4.2.2.3. Ensaio SDS-PAGE (Eletroforese Desnaturante em Gel de Poliacrilamida) 38
4.3. SOLO 3 39
4.3.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES 39
4.3.1.1. Equipamento utilizado 39
4.3.1.2. Preparação das soluções estabilizadoras 39
4.3.1.3. Montagem dos provetes de solo 39
4.3.2. ENSAIO CBR 40

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 41
5.1. INTRODUÇÃO 41
5.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO EM PRENSA MARSHALL 41
5.2.1. RESULTADOS CORRIGIDOS DO ENSAIO 41
5.2.2. MÉDIAS DAS FORÇAS E DEFORMAÇÕES OBTIDAS 43
5.2.3. COMPORTAMENTO FORÇA-DEFORMAÇÃO 45
5.3. ENSAIO SEM 48
5.4. ENSAIO SDS-PAGE 49
5.5. ENSAIO CBR 50
5.5.1. TRAÇADO DA CURVA FORÇA-PENETRAÇÃO 50

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 53
6.1. CONCLUSÕES 53
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 53

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

Anexos ..... B

A1. LEITURAS DO ENSAIO CBR PARA PROVETES COMPACTADOS COM 25 PANCADAS.....B

A2. LEITURAS DO ENSAIO CBR PARA PROVETES COMPACTADOS COM 55 PANCADAS.....C

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Partícula de argila e a sua carga superficial 4
Fig. 2 – Interação Argila – Água 4
Fig. 3 – Esquema do processo de precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática 7
Fig. 4 – Ninhos de térmitas na Austrália 8
Fig. 5 – Variação da força de compressão para solo não tratado e tratado com dose única 13
Fig. 6 – Variação da força de compressão para solo não tratado e tratado com dose dupla 14
Fig. 7 – Ensaios UCS; Curvas tensão-extensão: (a) Solo arenoso; (b) Solo areno-siltoso; (c)Solo areno-siltoso; (d) Silte Inorgânico [37] 15
Fig. 8 – Efeitos no pH nos diferentes solos 15
Fig. 9 – Localização dos Poços de Prospeção 18
Fig. 10 – Abertura do poço P1 18
Fig. 11 – Material recolhido na fundação do Poço P1 19
Fig. 12 – Curva granulométrica do Solo 1 20
Fig. 13 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 1 22
Fig. 14 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo1 22
Fig. 15 – Abertura do poço P2 23
Fig. 16 – Curva granulométrica do Solo 2 23
Fig. 17 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 2 25
Fig. 18 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo 2 25
Fig. 19 – Curva granulométrica do Solo 3 26
Fig. 20 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 3 27
Fig. 21 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo 3 28
Fig. 22 – Motoniveladora com escarificador (sup. esq.), camião auto-tanque (sup. dir.), cilindro pés de carneiro (inf. esq.) e cilindro vibrador de tambor (inf. dir.) 30
Fig. 23 – Esquema ilustrativo do provete 34
Fig. 24 – Esquema de montagem dos provetes 35
Fig. 25 – Prensa Marshall modelo 34-T0107 36
Fig. 26 – Correção da curva Marshall 37
Fig. 27 – Exemplo de correção da curva Marshall 37
Fig. 28 – Comparação das forças máximas do solo 1 44
Fig. 29 – Comparação das forças máximas do solo 2 44
Fig. 30 – Curvas força-deformação dos ensaios de compressão em prensa Marshall 47
Fig. 31 – Ensaio SEM do solo 1 48
Fig. 32 – Ensaio SEM do solo 2 49
Fig. 33 – Resultado do ensaio SDS-PAGE 50
Fig. 34 – Curvas força-penetração do ensaio CBR dos provetes compactados com 25 pancadas 51
Fig. 35 – Curvas força-penetração do ensaio CBR dos provetes compactados com 55 pancadas 51

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 1 – Produtos comercializados e fornecedores 10
Tab. 2 – Preços para aplicação de bioenzimas 11
Tab. 3 – Preços para o caso de utilização de solo de empréstimo 11
Tab. 4 – Dosagens utilizadas na experiência 12
Tab. 5 – Localização dos Poços de Prospeção na faixa de rodagem da EN110 18
Tab. 6 – Análise Granulométrica do Solo 1 20
Tab. 7 – Análise Granulométrica do Solo 2 24
Tab. 8 – Análise Granulométrica do Solo 3 26
Tab. 9 – Requisitos granulométricos para a utilização da bioenzima 28
Tab. 10 – Principais propriedades dos solos utilizados 31
Tab. 11 – Dosagem de GST a utilizar 34
Tab. 12 – Constituição dos provetes utilizados nos ensaios de compressão em prensa Marshall 34
Tab. 13 – Caracterização das amostras recolhidas 38
Tab. 14 – Forças máximas e deformações correspondentes do Solo 1 42
Tab. 15 – Forças máximas e deformações correspondentes do Solo 2 42
Tab. 16 – Médias das forças e deformações máximas 43
Tab. 17 – Resultados do CBR para uma compactação relativa de 100% 52

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$CaCO_3$ – Carbonato de Cálcio

AMR - Aplication Mass Ratio

CBR- California Bearing Ratio

DMR - Dilution Mass Ratio

GST - Green Soils Technologies

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MSDS - Material Safety Data Sheet

SDS- PAGE - Sodium Dodecyl Sulfate–Polyacrylamide Gel Electrophoresis

SEM - Scanning Electron Microscopes

TOH- Teorótimo de humidade

XRD - X-ray Diffraction

Fig. - Figura

Tab. - Tabela

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O solo é um corpo natural constituído por material mineral e orgânico, não consolidado, existente à superfície da terra, que esteve sujeito e evidencia o efeito da ação do clima e, de igual modo, de macro e microrganismos, que atuaram sobre o material originário do solo, de forma condicionada pelo relevo, ao longo de um dado período temporal [1]. Sendo o substrato físico de qualquer obra de engenharia civil, torna-se necessário ter em conta as suas propriedades e características, de modo a percecionar qual poderá ser o seu comportamento perante qualquer pressão aplicada sobre si.

Para as obras rodoviárias, é fundamental que o solo local apresente propriedades que suportem a ação proveniente do tráfego viário e, igualmente, das intempéries. Assim, consoante as características do solo disponível e as exigências da obra em causa, a correção e estabilização do solo é imprescindível. Neste sentido, existem diversos métodos para corrigir e estabilizar os solos, mas, atualmente, importa não só proceder à escolha correta a nível técnico e económico, como também a nível ambiental, perante as alterações climáticas que, por ação humana direta ou indireta, tem vindo a ser considerada uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas.

Na constante procura de metodologias que reduzam os impactes ambientais e, aliando a biotecnologia à engenharia civil, têm sido desenvolvidas alternativas a materiais amplamente utilizados, como a cal e o cimento, para a correção e consequente estabilização do solo, surgindo, assim, a bioestabilização.

Este tipo de estabilização consiste na adição de um certo composto orgânico ao solo, de modo a provocar transformações que induzem as características de deformabilidade, mecânica e permeabilidade, atingindo o objetivo de estabilização do mesmo. Este processo poderá ser realizado através de bioenzimas - moléculas proteicas que catalisam reações químicas no solo para formar uma ligação de cimentação que permite estabilizar a estrutura do solo e reduzir a afinidade do solo com a água.

Para uma melhor compreensão desta recente metodologia de estabilização de solos, esta dissertação apresenta bibliografia de análise interpretativa e comparativa entre alguns processos de estabilização de solos, expondo conceitos e classificações e apresentando os diferentes tipos de estabilização e estabilizadores, incluindo novos produtos provenientes de recentes pesquisas científicas.

Neste contexto, para validação dos processos de estabilização mencionados, foi realizado um conjunto de ensaios para avaliar o comportamento de diferentes solos com diferentes teores de bioenzima, O processo experimental que consta neste trabalho foi desenvolvido em conjunto com a empresa MatsWay.

1.2. MATSWAY

A MatsWay é uma empresa de investigação, desenvolvimento e transferência de tecnologia, *spin-off* da Universidade de Aveiro, criada em 2020. Esta empresa tem como principal objetivo o desenvolvimento de pavimentos rodoviários adequados a tecnologias de produção mais sustentáveis.

A empresa assenta a sua atividade no desenvolvimento e fornecimento de soluções construtivas com incorporação de tecnologias de elevado desempenho e baixo impacte ambiental, o que proporciona a redução do consumo energético nos processos de fabrico de pavimentos, a redução de emissões de gases nocivos e a redução do consumo de recursos naturais não renováveis.

O significativo conhecimento existente do sector da construção rodoviária permite a identificação adequada das soluções de reutilização apropriadas a cada tipologia de resíduo ou subproduto e, igualmente, a definição concreta de programas de caracterização, direcionados consoante as especificidades de cada aplicação.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento encontra-se estruturado em 6 capítulos, encontrando-se integrados no primeiro capítulo a exposição do enquadramento e objetivos da dissertação, a informação da empresa com que o trabalho foi desenvolvido e a presente organização do documento.

No capítulo 2 é enquadrado o tema nas suas diferentes componentes, explanando-se nomeadamente a origem das bioenzimas, métodos de estabilização biológicos, produtos comercializados, experiências nacionais e internacionais realizadas e, por último, uma pequena comparação dos custos de aplicação de bioenzimas vs custo de solo de empréstimo.

O capítulo 3 corresponde à caracterização e descrição dos solos utilizados nos ensaios e, também, do produto envolvido na preparação da solução estabilizadora. Os solos são caracterizados por intermédio da análise granulométrica, limites de consistência, teor ótimo de humidade e CBR. Ainda neste capítulo é realizada uma breve descrição dos requisitos da enzima utilizada acompanhada por um resumo do método de aplicação da mesma.

No capítulo 4 efetua-se a descrição detalhada do procedimento experimental levado a cabo, bem como o equipamento e material usado para a preparação dos provetes.

O capítulo 5 é reservado para a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios.

No último capítulo, o capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e sugestões de alguns trabalhos futuros.

2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

O conceito de estabilização é considerado tão antigo quanto a própria construção [2]. Diferentes técnicas de estabilização foram utilizadas ao longo dos tempos, o que se poderá verificar nas antigas estruturas chinesas, romanas e incas, ou, também, em sistemas rodoviários que ainda hoje existem [3]. No Antigo Egipto e na Mesopotâmia, as estradas de terra eram estabilizadas mecanicamente, enquanto, por sua vez, os gregos e os romanos usavam a cal como estabilizador.

2.1.1. OBJETIVO

A disponibilidade de superfície terrestre para o desenvolvimento comercial, industrial e de transporte é escassa. Perante essa escassez, é inevitável a utilização de solos com fracas propriedades de engenharia, tornando necessária a melhoria das suas qualidades. A estabilização tem como finalidade aperfeiçoar as qualidades físicas e químicas de um determinado solo, devendo abranger, assim, a compactação, a pré-consolidação, a drenagem e outros processos, de modo a que o solo possa ser utilizado para fins de engenharia [4]. O aumento do peso seco e das capacidades de carga, as alterações de volume, a melhoria do desempenho do subsolo *in situ*, a utilização de areias e outros materiais residuais para reforçar as superfícies das estradas [5] são exemplos de melhorias providenciadas pelo processo de estabilização.

2.1.2.INTERAÇÃO ARGILA-ÁGUA

Constituída por partículas muito finas e diversos minerais, a argila é um dos principais problemas para a estabilidade do solo. Consoante o tipo de argila contida na massa do solo, as mesmas poderão apresentar flutuações de volume significativas devido a variações no teor de água [6, 7], sendo estes denominados de solos expansivos.

Tal como a sua nomenclatura indica, a aplicação do termo expansivo ocorre nos solos que expandem na presença de água e encolhem quando secam. Estes solos são argilosos, com uma elevada área de superfície específica e capacidade de troca catiónica. Devido à pequena dimensão das suas partículas e à sua atividade superficial, os solos argilosos têm uma grande afinidade pela água. Assim, as partículas são quase sempre hidratadas, isto é, rodeadas por camadas de moléculas de água adsorvidas sobre as partículas de argila. Esta camada de água (Fig. 1) afeta significativamente propriedades do solo, como a plasticidade, a compactação, a força e a movimentação de água no solo [8] e, para colmatar esta interação argila-água, surgem os bioestabilizadores como estabilizadores de solo.

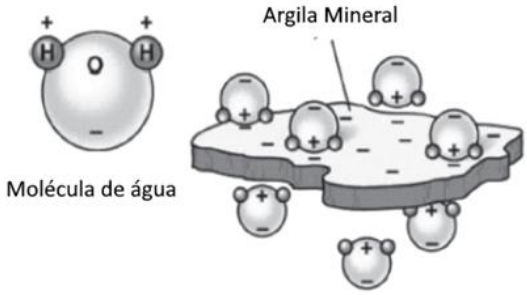


Fig. 1 – Partícula de argila e a sua carga superficial

As partículas de argila têm uma elevada concentração de catiões como forma de equilibrar as cargas negativas da sua superfície causadas pela presença de ligações quebradas. As partículas de argila carregadas negativamente mantêm, de forma firme, estes "catiões adsorvidos" [9]. Com o objetivo de equilibrar a baixa concentração de catiões dentro da água adsorvida, os catiões procuram difundir-se para longe da superfície da argila. Contudo, a interação electroestática entre catiões carregados positivamente e a superfície argilosa carregada negativamente, que é mais forte perto das partículas de argila, contraria este tipo de difusão. A superfície argilosa carregada negativamente, juntamente com os catiões fortemente retidos (perto das partículas de argila) e os catiões difusos relativamente soltos (mais afastados das partículas de argila), formam uma dupla camada difusa [10]. Esta camada rege a interação argila-água e afeta as propriedades do solo incluindo o inchaço e a plasticidade (Fig. 2).

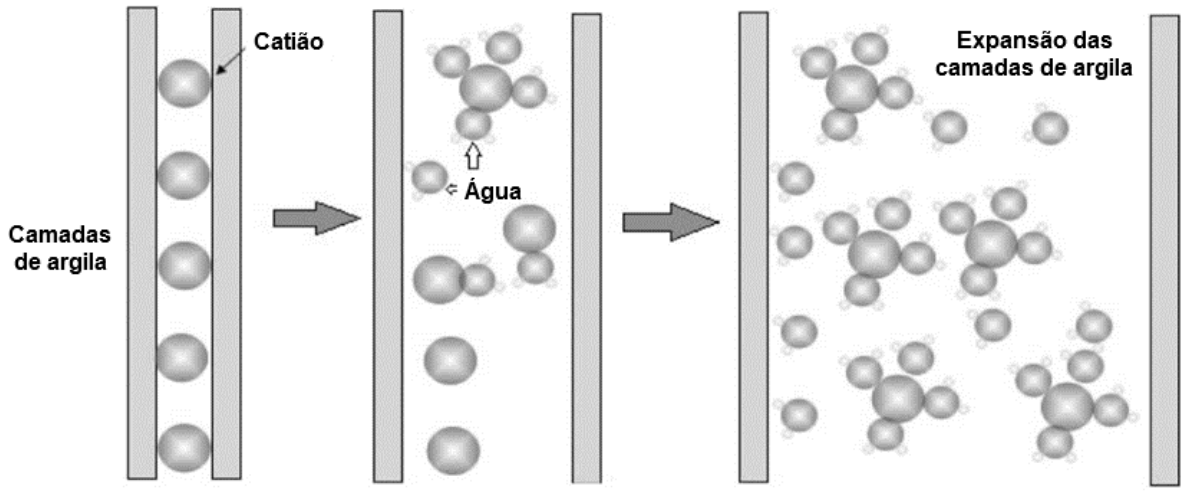


Fig. 2 – Interação Argila-Água

2.1.3. TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO – TRADICIONAL VS NÃO TRADICIONAL

Dado que a natureza e as qualidades do solo natural variam, é necessário selecionar uma estratégia de estabilização apropriada para uma circunstância específica, tendo em conta as características do solo.

A cal, o betume e o cimento são exemplos de estabilizadores tradicionais de solo e a sua utilidade tem sido bastante documentada [11]. No entanto, estes estabilizadores não se constituem como rentáveis e, alguns destes, foram identificados como "pouco" amigos do ambiente [12]. Estudos recentemente desenvolvidos no âmbito da rentabilidade e do impacto ambiental da estabilização dos solos têm permitindo observar que os estabilizadores tradicionais não são tão rentáveis quanto outras técnicas.

De igual modo, os referidos estudos expõem os estabilizadores não tradicionais, os bioestabilizadores - estabilizadores orgânicos, biodegradáveis e ambientalmente aceitáveis. Cinzas de espiga de milho, cinzas volantes, escória de aço, basanite recuperada, pó de mármore, cimento de inspiração microbiana e cinzas de casca de arroz são alguns dos materiais cujos efeitos estabilizadores foram explorados e documentados.

2.2 ESTABILIZADORES TRADICIONAIS

Tal como referido anteriormente, a estabilização tradicional pode ser realizada através de diferentes tipos de aditivos químicos, tais como a cal, o cimento e a emulsão betuminosa. Estes estabilizadores são as soluções técnicas mais adotadas pela engenharia civil para a estabilização de solos em obras rodoviárias.

2.2.1. SOLO-CAL

A cal é um aglomerante que é conseguido através da transformação do carbonato de cálcio pela ação do calor. Existem registos da utilização da cal como estabilizador desde o Império Romano para a execução da Via Ápia [13].

A estabilização solo-cal resume-se à mistura de cal, água e solo em proporções determinadas através de ensaios laboratoriais. Na aplicação de cal no solo, surgem alguns efeitos como a modificação da granulometria do solo, devido à ocorrência de floculação, o crescimento do limite de plasticidade e atenuação do limite de liquidez, a redução das variações de volume dos solos expansivos, a redução da densidade e, por fim, um aumento do teor de humidade e da resistência à compressão simples.

2.2.2. SOLO-CIMENTO

O cimento é um aglomerante hidráulico [13]. Este apresenta-se como um agente estabilizador de solos primário, uma vez que não depende dos materiais existentes no solo, mas sim da presença de água, estando esta disponível na maioria dos solos. A presença de água é a principal razão pela qual o cimento pode ser usado sozinho para estabilizar vários tipos de solo.

A estabilização solo-cimento é realizada a partir de uma mistura criteriosa de solo, cimento e água, com posterior compactação e cura. A escolha do tipo de cimento depende do solo a ser tratado e da resistência final desejada e, por sua vez, a dose de cimento a aplicar deverá obedecer aos requisitos definidos nas normas.

Os solos estabilizados com cimento apresentam melhorias em parte das suas propriedades, como a redução da plasticidade, a redução da compressibilidade e o ganho de resistência mecânica, ocorrendo estas sem a eliminação da flexibilidade natural do solo.

2.2.3. EMULSÃO BETUMINOSA

Perante o facto da emulsão betuminosa se estabelecer como um material mais caro, o uso destas emulsões como estabilizadores não é tão comum como os referidos anteriormente. Neste tipo de tratamento, o material betuminoso pode ser adicionado ao solo sob a forma fluída ou de óleo, seguindo um conjunto de regras.

A emulsão betuminosa apresenta-se como uma técnica normalmente utilizada em solos com granulometria fina e em areias [13]. No caso dos solos de granulometria fina, as emulsões têm por função promover a impermeabilização. No que diz respeito ao solo arenoso, o betume visa promover a ação ligante entre as partículas para dar coesão ao solo.

Estas emulsões são classificadas como de rotura lenta, rotura média e rotura rápida, sendo estas classificações atribuídas de acordo com a rapidez com que ocorre a rotura.

2.3. BIOESTABILIZAÇÃO E O SEU PROCESSO QUÍMICO

A bioestabilização é um processo de melhoramento do solo que inclui a precipitação de um ligante, geralmente o carbonato de cálcio – $CaCO_3$ –, no espaço poroso do solo para ligar as suas partículas, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do mesmo.

O mecanismo de precipitação de carbonato de cálcio mais estudado é a hidrólise da ureia e o mesmo pode ser conduzido por via bacteriana (MICP - *Microbial Induced Calcite Precipitation*) ou por via enzimática (EICP – *Enzyme Induced Calcite Precipitation*). Ambas as técnicas têm sido muito utilizadas na estabilização de solos, por se apresentarem sustentáveis e amigas do ambiente e, também, por partilharem um processo similar para a precipitação do $CaCO_3$, variando apenas a origem da enzima.

A $CaCO_3$ forma-se segundo as seguintes equações (2.1) e (2.2):

$$\mathrm{CO(NH_2)_2} + 2\mathrm{H_2O} \xrightarrow{Urease} 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \tag{2.1}$$

$$\mathrm{Ca^{2+}} + \mathrm{CO_3^{2-}} \xrightarrow{Urease} \mathrm{CaCO_3} \tag{2.2}$$

Este processo só se torna possível devido à enzima *urease* que, tal como dito anteriormente, tem um importante papel na bioestabilização, estando esta presente na natureza, em várias plantas, leveduras e bactérias. Esta enzima é bastante utilizada devido ao seu baixo custo de aquisição em comparação às enzimas bacterianas que necessitam de reatores par a sua produção, o que as torna bastante mais caras.

2.3.1. PRECIPITAÇÃO DE CACO3 POR VIA BACTERIANA (MICP)

Para obtermos o máximo rendimento das bactérias, relativamente à produção de *urease*, as condições de pH, temperatura, tempo de incubação e meio nutriente apropriado, terão de ser satisfeitas. Ainda que esta técnica promova a formação de ligações de $CaCO_3$ entre as partículas do solo, fazendo com que exista um aumento da resistência e da rigidez, e, também, uma redução da permeabilidade e do índice de vazios [14], a MICP apresenta algumas desvantagens/preocupações:

- Tipo de solo;
- Questões ambientais;
- Tratamento uniforme do solo;

- Mau desempenho quando utilizada em solos muito finos;
- Após a sua utilização, esta técnica deixa microrganismos, ou seja, pode exigir autorizações das autoridades competentes e inspeção regular para que estes microrganismos não sejam perigosos para o ambiente.

2.3.2. PRECIPITAÇÃO DE CaCO3 POR VIA ENZIMÁTICA (EICP)

A utilização das enzimas de forma direta simplifica o processo de precipitação, uma vez que não se considera necessário que as condições específicas para o cultivo de bactérias sejam garantidas [15]. A adição da enzima *urease* a uma solução de ureia e cloreto de cálcio está na base deste processo, tal como ilustrado na Fig. 3.

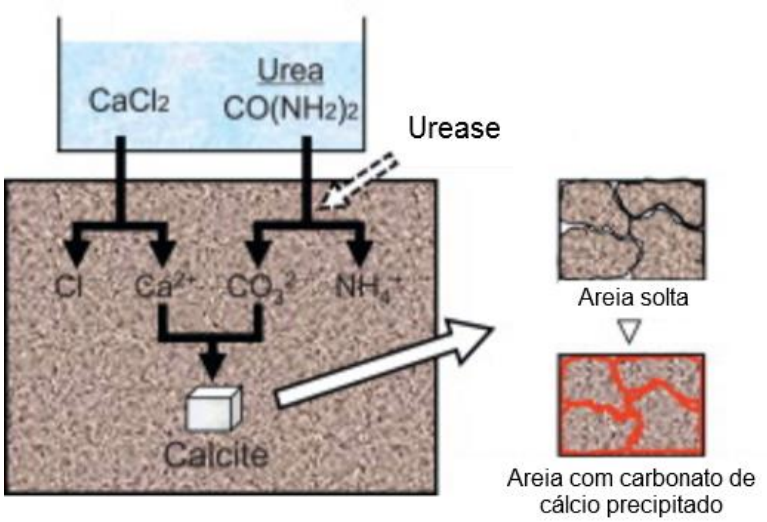


Fig. 3 – Esquema do processo de precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática

A quantidade de $CaCO_3$ precipitada depende da concentração da enzima *urease*, ureia e cloreto de cálcio, bem como da temperatura [15]. A variação de temperatura (de 20 para 50 graus) induz um aumento, tanto da produção de carbonato de cálcio, como da reação de precipitação. Apesar desta técnica reduzir a permeabilidade do solo, podendo ser aplicada na consolidação de areias em reservatórios e na solidificação de solos contaminados com um elevado teor de isótopos radioativos [15], esta apresenta como desvantagem o elevado custo das enzimas, pois 57% a 98% do custo é relativo à enzima *urease* [16].

Deste modo, tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada um dos mecanismos de precipitação de carbonato de cálcio, a perceção é que o EICP se apresenta mais vantajoso que o MICP. Uma das principais razões para afirmarmos isto é a questão ambiental, pois ao introduzirmos bactérias no solo, este ficará contaminado.

2.3.3. PRODUÇÃO DA ENZIMA *UREASE*

Tal como referido anteriormente, a enzima *urease* pode ser encontrada em bactérias e em algumas plantas, como são exemplo o feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) ou os grãos de soja.

Para obtermos a enzima, os grãos de soja são moídos através de um moedor de cozinha e peneirados até obter um pó com o tamanho de partículas inferior a 0,15 mm. Antes da sua utilização, este pó é armazenado num frigorifico a 4ºC. Após atingir a temperatura de armazenamento, é adicionada água destilada ao pó, sendo a mistura feita através de um agitador magnético até ser obtido um líquido de suspensão homogéneo. Esta suspensão é novamente armazenada a 4ºC durante 24 horas. Passado o tempo de armazenamento, a suspensão é centrifugada a 3000 rpm durante 15 minutos, obtendo-se, assim, novamente, um líquido flutuante que contem a enzima *urease.*

2.4. BIOENZIMAS

As bioenzimas são catalisadores biológicos que podem reduzir a energia de ativação para produção de um produto a partir de outro, favorecendo certas geometrias no estado de transição [17]. Estas enzimas são moléculas proteicas que catalisam as reações químicas no solo para formar uma ligação que visa a estabilização do solo e reduz a sua afinidade com a água [18].

A utilização de produtos enzimáticos com o fim de melhorar os pavimentos nasce do resultado obtido pelos mesmos em plantações hortícolas [19]. Uma pequena modificação no processo deu origem a uma substância que pode ser utilizada para estabilizar solos para o tráfego rodoviário, tornando-os mais densos, firmes, duros e resistentes á água.

Outra teoria observada resulta da técnica de estabilização através das térmitas e das formigas. Foi relatado que a saliva destes seres está repleta de enzimas e é utilizada para construir estruturas, que são de rocha dura, chegando, por vezes, a atingir 8 metros de altura, como podemos observar na Fig. 4.



Fig. 4 – Ninhos de térmitas na Austrália

2.4.1. ORIGEM DAS BIOENZIMAS

Vários produtos enzimáticos são comercializados a nível mundial, mas pouco se sabe sobre as suas formulações, uma vez que a sua composição não é tornada pública dado o seu valor comercial. A publicação da patente de Lindenbaum [20] é uma das fontes de informação existentes relativamente à composição destes bioestabilizadores. Segundo Lindenbaum, a composição das enzimas utilizadas para a estabilização de solos contem microrganismos obtidos através da fermentação. Também Cuisinier e Masrouri [21] mencionam que a origem destas enzimas está associada à fermentação do melaço de

açúcar, um resíduo proveniente da indústria açucareira. Khan e Taha [22] relataram que estas substâncias têm origem orgânica, não tóxica e são geralmente extraídas através da fermentação de vegetais e canas de açúcar, sendo, assim, degradáveis e de fácil decomposição. As enzimas são encontradas em todos os organismos, inclusive em micróbios unicelulares.

2.4.2- MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DAS BIOENZIMAS COMO ESTABILIZADORES

Ao contrário dos estabilizadores tradicionais, o mecanismo de funcionamento de estabilizadores alternativos, como as bioenzimas, tem sido pouco estudado. Vários artigos foram publicados com resultados de experiências de laboratório e de campo, mas grande parte das experiências tinham como foco central a avaliação de desempenho e não o mecanismo de funcionamento. Perante a parca existência de literatura sobre o funcionamento das bioenzimas, foram propostos dois mecanismos de estabilização do solo por via enzimática por investigadores.

O primeiro mecanismo proposto explicitou que as enzimas ao serem aplicadas no solo são adsorvidas pela grade de argila, fazendo com que os catiões sejam libertados como uma troca, o que promove a redução da espessura da camada de argila [18].

A outra hipótese aceite, proposta por Scholen, revelou que as enzimas, quando misturadas com o solo, combinam com as grandes moléculas orgânicas, gerando, assim, um mediador reagente [17]. Estas moléculas orgânicas apresentam grandes estruturas planas que se aproximam do tamanho das pequenas partículas de argila, podendo desta forma cobrir os minerais argilosos, neutralizando a carga negativa e diminuído a afinidade da argila pela humidade. Como resultado, é criado um efeito de cobertura, o que promove uma menor absorção de água e perda de densidade. Esta reação potencia a regeneração das enzimas, favorecendo a continuação repetida do processo.

Vários investigadores demostraram a formação de argila estável e uma afinidade reduzida com a humidade após tratamento com várias soluções bioenzimáticas. Rauch, através de diferentes testes químicos e físicos, subscreveu a hipótese proposta por Scholen [23 e 17]. Também Santoni e Tingle, em diferentes estudos, relataram uma série de testes laboratoriais com vários estabilizadores bioenzimáticos que avaliaram o desempenho em termos de força, tanto em materiais granulares como em materiais finos do subsolo [24, 8, 25].

Contudo, Lindenbaum [20], Rauch [23], Stan e Ciobanu [26] e John [27] sugeriram que para a adequação do solo para a estabilização através das bioenzimas, este deveria conter substâncias químicas, tais como minerais argilosos, que possam reagir com outros químicos, ou seja, as enzimas são apropriadas para solos argilosos, particularmente argilas com uma certa plasticidade. Além disso, estes autores referiram que a utilização das enzimas será criticamente dependente das condições ambientais, podendo demorar bastante tempo a ocorrerem [18, 28]. Através de diferentes produtos químicos e testes físicos, Rauch comprovou a tese anteriormente explicada de Scholen que afirma que as enzimas combinam com as moléculas orgânicas e aderem à superfície de argila.

Na publicação da sua patente, Lindenbaum explicou igualmente um mecanismo em que a bioenzima quebra a dupla camada elétrica entre a argila e água estática adsorvida, durante a estabilização do solo [20]. Com isto, as partículas de argila perdem a sua carga inerente e soltam a camada de água estática aderida. Neste mecanismo, as partículas de argila segregam-se e são tão fixadas cristalograficamente que impedem qualquer alteração de volume quando expostas à humidade.

Lindenbaum acrescenta que os catiões orgânicos, gerados pelo crescimento da vegetação e dos microrganismos, terão a capacidade de trocar de posição com outros iões atraídos pela placa de argila no solo. Os catiões orgânicos, ao contrário dos catiões metálicos, têm enormes estruturas planas que são

semelhantes em tamanho a pequenas partículas de argila. Estes catiões orgânicos conseguem cobrir a partícula de argila, neutralizando de forma eficaz a sua carga negativa numa curta distância e, consequentemente, reduzindo significativamente a espessura da camada dupla [18].

2.5. PRINCIPAIS PRODUTOS COMERCIALIZADOS E TESTES REALIZADOS

2.5.1- PRODUTOS COMERCIALIZADOS

Atualmente existem vários produtos enzimáticos a serem comercializados no mercado (Tab. 1). Estes produtos, por norma patenteados, não cumprem nenhuma especificação formal e não são cobertos por quaisquer diretrizes de alguma autoridade do país onde são fabricados. Desde os aos 60, estes produtos têm estado em desenvolvimento como fruto de vários trabalhos de investigação e projetos, mas, apesar da grande quantidade de informação disponível, a sua aceitação ainda não ocorreu.

Tab. 1 – Produtos comercializados e fornecedores

Produto	Fornecedor
Earthzyme	*Cypher Environmental Ltd, Winnipeg Manitoba, Canada*
Paczyme	*Rainstorm Dust Control (Pty) Ltd*
Terrazyme	*Concord (USA) Ltd, Columbia*
ECOroads	*Terrafusion International, Inc*
Perma-Zyme	*Pacific Enzymes Inc.*
Zyme-Tech	*Zyme Technologies, Iceland*
Roadzyme	*Hobe Associates*
PaveZyme	*Omega Paving*
EcoTerra	*EcoTerra Technologies*
PK – 4	*Ecoenzymes Australia*
BoroZyme	*Boron Innovations*
DZ-1X	*Dhara Biotech*
EMC squared	*Soil Stabilization Products*
Endurazyme	*World Enzymes Australia*
Roadtech	*Target Technologies Int.*
UBIX	*Enzymes Plus*
EnzymeRoads	*ECO Susteinable System*
Ecomax	*ZymTec/i-Tec-India*
EKO soil	*EKO, United States*
Nrzyma	*Enzymes Plus*

Tal como observável na Tab. 1, o fabrico de produtos enzimáticos encontra-se espalhada um pouco por todo o mundo, com maior incidência na Austrália, na Europa, África e Estados Unidos, sendo este último o maior produtor e exportador [29]. As bioenzimas são frequentemente comercializadas como soluções concentradas, o que permite diminuir exponencialmente o custo de transporte. Consequentemente, as bioenzimas devem ser diluídas com água no local de trabalho, antes de serem aplicadas no solo ou injetadas sob pressão para tratar camadas mais profundas do solo. Perante os baixos custos de transporte e de produção e, também, às tecnologias não tóxicas utilizadas, a bioenzimas têm recebido uma maior atenção face aos estabilizadores tradicionais.

2.5.2. PREÇOS DE APLICAÇÃO DAS BIOENZIMAS VS SOLO DE EMPRÉSTIMO

Para a perceção da vantagem económica das bioenzimas, realizou-se uma estimativa orçamental para permitir a comparação de custos entre aplicação de bioenzimas e o uso de solo de empréstimo (aproximadamente a 20 km de distância da obra). Os preços utilizados para os cálculos foram facultados pela construtora portuguesa Mota-Engil.

Na Tab. 2, é possível observar os preços para aplicação das bioenzimas, sendo considerada a escarificação duas vezes, devido à necessidade de escarificar primeiro e, de seguida, remexer a terra para envolver a solução estabilizadora, o que será exposto mais à frente no modo de aplicação do produto.

De modo a exemplificar o custo de aplicação de uma bioenzima foi selecionada a enzima *Perma-Zyme*. Este produto bioenzemático é vendido em baldes de 5 galões, o que dá aproximadamente 19 litros, a um preço de 2200 euros. Segundo o fabricante, para efetuar a estabilização de 114,68m^3 necessitamos de 3,785 litros de solução, ou seja, por m^3 precisaremos de 0,033 litros, o que dá 3,83 €/m^3.

Tab. 2 – Preços para aplicação de bioenzimas

Tarefa	Preço por m^3
Escarificação do solo (x2)	2,60 €/m^3
Aplicação da solução	0,20 €/m^3
Nivelamento e compactação	4,00 €/m^3
Preço da bioenzima	3,83 €/m^3
Total	10,63 €/m^3

Na Tab. 3, são demonstrados os preços para o caso de solo de empréstimo, com inclusão da extração, do transporte e da aplicação, entre outros trabalhos que fazem parte deste processo.

Tab. 3 – Preços para o caso de utilização de solo de empréstimo

Tarefa	Preço por m^3
Remoção e carga do solo existente	1,5 €/m^3
Transporte do Solo removido para depósito	2,0 €/m^3
Indeminização dor depósito	4,0 €/m^3

Tarefa	Preço por m^3
Espalhamento do solo no local do depósito	0,30€/m^3
Escavação e carga de solos de empréstimo	1,5 €/m^3
Aquisição do solo	2,0 €/m^3
Transporte para local de aplicação (20 km)	19,0 €/m^3
Espalhamento e compactação	2,5 €/m^3
Total	32,8 €/m^3

Através destas estimativas orçamentais acimas descritas, conclui-se que a utilização das bioenzimas reduz para um terço os custos de estabilização, bem como a quantidade de trabalhos em obra, o que reduzirá o tempo de execução dos trabalhos.

2.6. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Ao longo dos últimos anos muitos têm sido os estudos sobre as bioenzimas quer a nível nacional como internacional. Alguns destes estudos com grande sucesso, outros menos conseguidos.

2.6.1. EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

Foram selecionados três tipos de bioenzimas para um estudo a DZ-1X, a EarthZyme e a TerraZyme, designadas como EI, E-II e E-III respetivamente. [22] As fichas de dados de segurança (MSDS – Material Safety Data Sheet) da EarthZyme e da TerraZyme foram fornecidas pelos fornecedores, mas o mesmo não aconteceu com a bioenzima DZ-1X. As propriedades de E-I foram determinadas em laboratório. Os ingredientes principais de E-II e E-III são surfactantes não iónicos e carbohidratos. E- II continha hidratos de carbono (polissacáridos, oligossacarídeos, dissacarídeos e monossacarídeos) e E-III consistia em extrato vegetal fermentado. Foram usadas duas doses diferentes para cada uma das três enzimas, primeiro dose única, recomendada pelo fornecedor, e em segundo lugar, dose dupla, duas vezes a recomendada, indicadas como D1 e D2, respetivamente.

DMR- Dilution mass ratio- é a razão de massa de um produto químico concentrado para água, utilizado para expressar a diluição do produto em água antes da aplicação no solo

AMR- Application mass ratio – é a razão de massa de um produto químico concentrado para material seco em estufa no solo tratado.

Devido ao facto de as dosagens recomendadas pelos fornecedores serem muito baixas, as enzimas são diluídas em água antes da sua aplicação. As doses recomendadas pelos fornecedores e utilizadas ao longo da experiência bem como a DMR, AMR e os rácios de aplicação estão apresentados na Tab. 4.

Tab. 4 – Dosagens utilizadas na experiência

Estabilizador	E-I (DZ-1X)	E-II (EarthZyme)	E-III (TerraZyme)
Dosagem recomendada pelo fornecedor	1 l/4.2 m^3	1 l/33 m^3	1 l /25 m^3

Estabilizador	E-I (DZ-1X)	E-II (EarthZyme)	E-III (TerraZyme)
Relação de massa de diluição equivalente (DMR)	5/1000	1/1000	1/1000
Relação de massa de aplicação equivalente (AMR)	1/7500	1/58900	1/44600
Proporção de diluição aplicada (ml/kg de solo)	27	17	22

Foram realizados três testes geotécnicos ao solo, os limites de Atterberg ou consistência, compactação e resistência à compressão não confinada (uniaxial) (UCS). Para o teste UCS e para os limites de Atterberg previram períodos de cura de 7, 28 e 56 dias. No entanto foi posteriormente decidido curar as amostras para 28, 56 e 84 dias porque não foi observada qualquer melhoria nos testes UCS após 7 dias em nenhuma das enzimas nas duas dosagens utilizadas.

RESULTADOS OBTIDOS

Apesar de terem sido realizados três testes, o ensaio de resistência à compressão não confinada é o mais importante. Foi realizado o *The Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil* (ASTM D 2166), para avaliar a resistência máxima à compressão de amostras de solo tratadas e não tratadas. Após os períodos de cura, as amostras foram abertas e cortadas em três amostras do tamanho necessário, tendo sido de seguida pesadas e testadas. Estas amostras foram testadas numa máquina com controlo de tensão e a média das três tensões finais foi tomada como o valor final.

Os resultados obtidos estão representados na Fig. 5 e na Fig. 6, estando na Fig. 5 os resultados para os as amostras de controlo (NT) e para os provetes tratados com dose única de bioenzimas e na Fig. 6 para as amostras de controlo (NT) e para os provetes tratados com dose dupla. De acordo com o observado nas seguintes figuras, os resultados de E-I para as duas doses não mostraram qualquer melhoria, enquanto que para as enzimas E-II e E-III, houve uma pequena melhoria. O aumento máximo de força foi registado para E-III-D2, de 17%. Os resultados foram geralmente moderados, ou a melhoria foi, em casos individuais, sem qualquer padrão persistente.

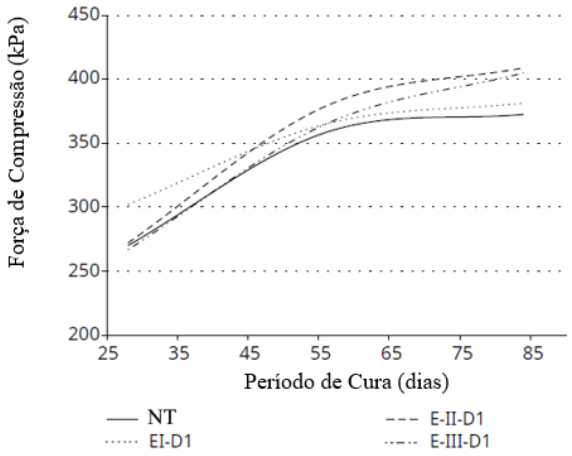


Fig. 5 – Variação da força de compressão para solo não tratado e tratado com dose única

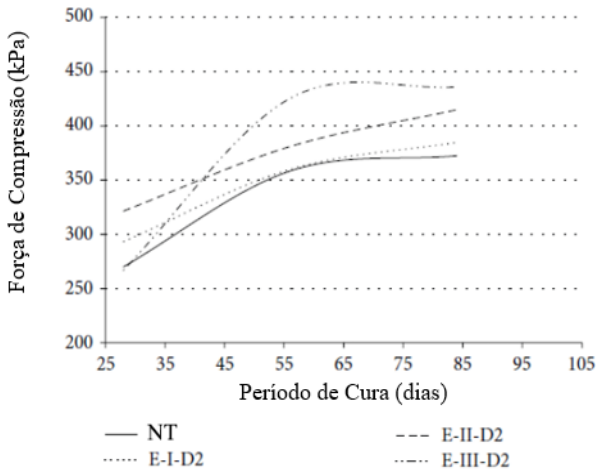


Fig. 6 – Variação da força de compressão para solo não tratado e tratado com dose dupla

2.6.2. EXPERIÊNCIAS NACIONAIS

Também em Portugal foram realizadas experiências no âmbito da bioestabilização. No Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, a precipitação de $CaCO_3$ tem sido bastante estudada, tanto a nível enzimático [30] como bacteriano [31].

A influência do tipo de solo no processo de precipitação de $CaCO_3$ por via enzimática permitiu concluir que este processo tem maior sucesso em solos arenosos e siltosos, com ganhos de resistência de 40% e 106%, como podemos verificar na Fig. 7. Do mesmo modo, foi possível perceber que, após a bioestabilização, os níveis de pH diminuem, fruto da libertação de Cloreto de amónio (NH_4Cl) (Fig. 8). Carmona constatou que quanto maior for o tempo de cura e a concentração da enzima *urease*, mais rápida será a precipitação de carbonato de cálcio, tendo notado maior relevância nos primeiros sete dias, obtendo-se uma atenuação da quantidade precipitada após esse período. [30]

Com o objetivo de estudar a precipitação por via bacteriana, Costa e Venda Oliveira compararam a eficácia das bactérias *Sporosaarcina pasteuri* e *Idiomarina insulisalsae* num solo arenoso, tendo sido atestada uma maior eficácia por parte da *Idiomarina insulisalsae.*

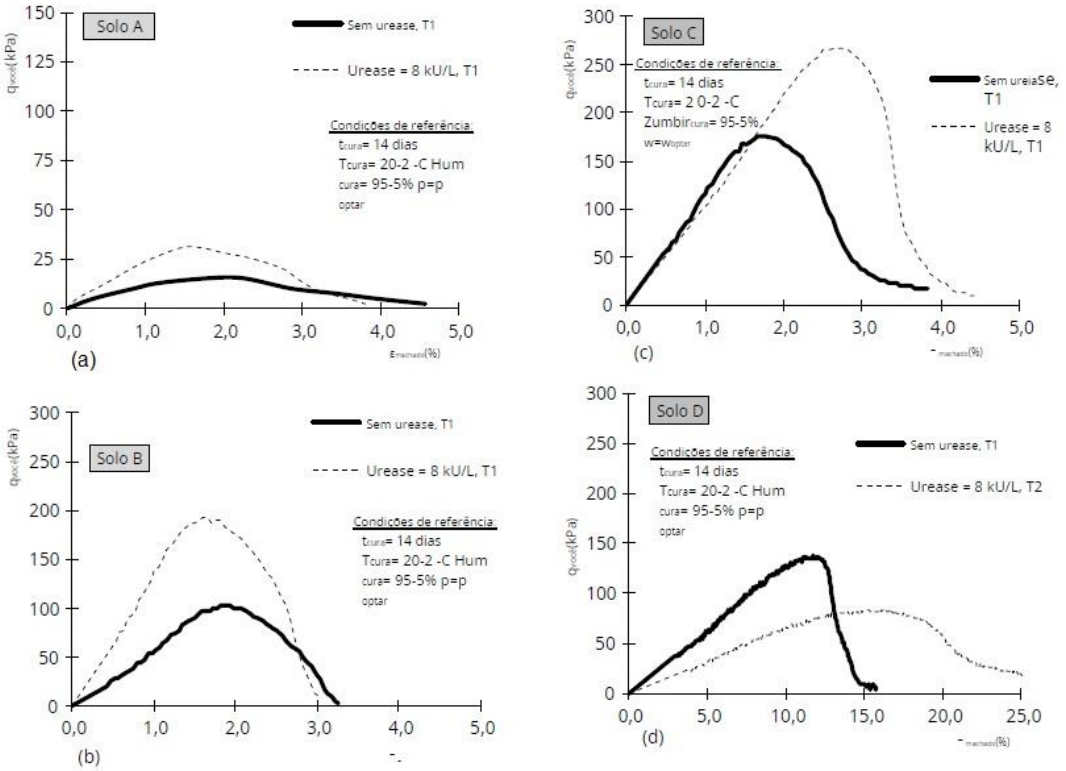


Fig. 7 – Ensaios UCS; Curvas tensão-extensão: (a) Solo arenoso; (b) Solo areno-siltoso; (c)Solo areno-siltoso; (d) Silte Inorgânico [30]

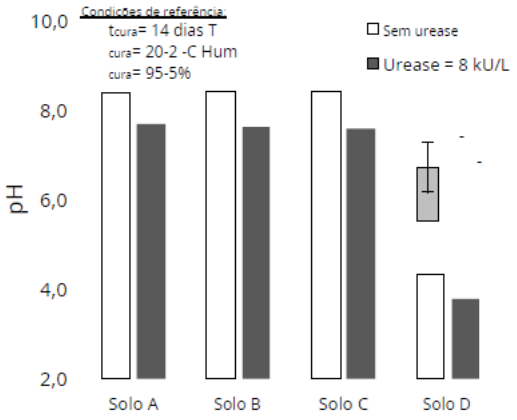


Fig. 8 – Efeitos no pH nos diferentes solos

3
CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E DA BIOENZIMA GST

3.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como foco central a análise da influência de uma bioenzima na resistência dos solos. Para a caracterização dos solos utilizados no estudo, determinou-se a distribuição granulométrica, os limites de Atterberg – limite de plasticidade, de liquidez e, consequentemente, o índice de plasticidade –, o teor ótimo de humidade e o CBR.

Assim, para a análise da influência de uma bioenzima em solos, foram utilizados três solos para a realização do procedimento experimental, dois provenientes de um estudo integrado no projeto de requalificação da EN110 em Tomar, pedido pela Câmara Municipal de Tomar à empresa Basetripla, visando a caracterização da estrutura de pavimento existente, bem como as suas condições de fundação e, por sua vez, o último provém de um solo de empréstimo para uma obra. Este último solo só foi disponibilizado numa fase muito tardia dos trabalhos.

3.2. SOLOS UTILIZADOS

Realizada em Tomar, a aquisição do solo 1 e 2 foi realizada através da programação de uma prospeção segundo as orientações do requerente que levou à execução de dois poços de prospeção. A localização dos trabalhos de campo encontra-se ilustrada na Fig. 9.



Fig. 9 – Localização dos Poços de Prospeção

Os poços de prospeção têm a localização aproximada indicada na Tab. 5.

Tab. 5 – Localização dos Poços de Prospeção na faixa de rodagem da EN110

Poço	Via	Coordenadas Google Earth	
P1	Via direita	39º35'31.46"N	8º24'21.16"W
P2	Via esquerda	39º34'18.36"N	8º23'38.66"W

3.2.1. SOLO 1

O poço 1 teve uma dimensão de 70 x 70 cm^2 em planta. Na Fig. 10, é apresentada uma foto do poço durante a sua abertura, onde são observáveis as diferentes camadas constituintes do pavimento – camadas betuminosas, pedra calcária e solo de fundação do pavimento. O solo de fundação será denominado de "Solo 1", tendo sido utilizado durante a realização do trabalho laboratorial.



Fig. 10 – Abertura do poço P1

A abertura do poço permitiu verificar que as camadas betuminosas perfazem 17cm de espessura. Abaixo das camadas betuminosas, constatou-se a presença de uma camada constituída por pedra calcária de 10 a 15cm de espessura, disposta de forma regular. A partir dos 32cm de profundidade e até aos 65cm, observou-se a camada de solo de fundação, constituído por areia siltosa, de cor amarelada e alguma pedra calcária de dimensão reduzida. Do mesmo modo, verificou-se também a presença de algum seixo arredondado misturado neste solo. A partir dos 50cm de profundidade, o solo aparenta ter menos material pétreo. Na Fig. 11 encontra-se ilustrado o material recolhido da fundação de pavimento.



Fig. 11 – Material recolhido na fundação do Poço P1

3.2.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O conhecimento da composição granulométrica de um solo é fundamental para se compreender e prever o seu comportamento. Não basta saber a natureza mineralógica global do solo, importa também conhecer a dimensão das suas partículas, mais precisamente a distribuição dimensional dos grãos e, também, o comportamento da argila.

Para quantificar a distribuição granulométrica do solo utilizado durante os ensaios, foram executados os procedimentos referidos na especificação E 239 – 1970 do LNEC. Na Fig. 12, está representada a curva granulométrica do solo de fundação do solo 1 e, na Tab. 6, a análise granulométrica deste solo e as respetivas percentagens de material retido em cada peneiro.

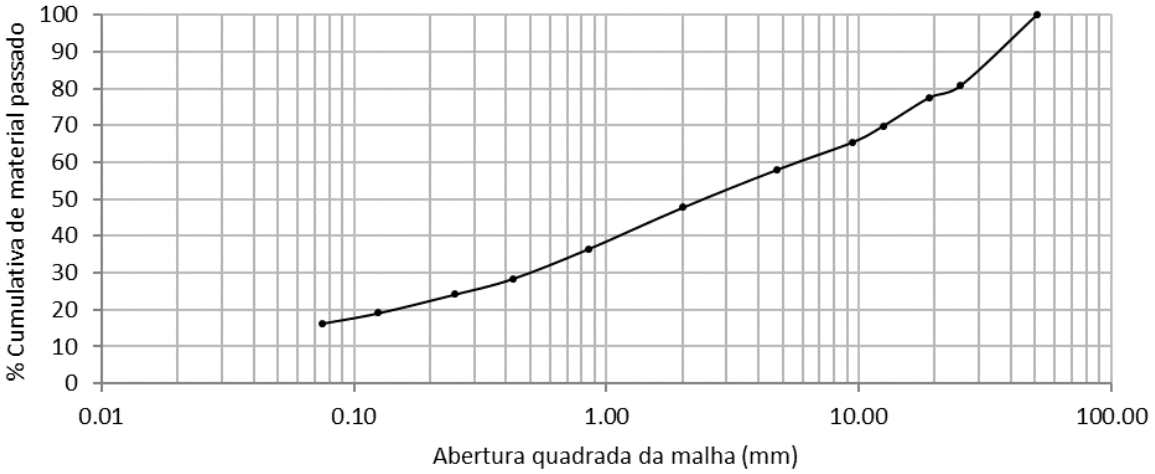


Fig. 12 – Curva granulométrica do Solo 1

Tab. 6 – Análise Granulométrica do Solo 1

Massa seca total, M1	1.364,7 g
Massa seca após lavagem, M2	1.153,5 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, M1-M2	211,2 g

Peneiros		Material retido (g)	Material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado
Abertura	mm			
4 “	101,8	0,0	0,0	100,0
2 ”	50,8	0,0	0,0	100,0
1 ”	25,4	261,0	19,1	80,9
3/4 “	19,0	45,4	3,3	77,5
1/2 “	12,5	104,3	7,6	69,9
3/8 “	9,50	59,6	4,4	65,5
4	4,75	102,5	7,5	58,0
10	2,00	140,7	10,3	47,7
20	0,850	152,4	11,2	36,5
40	0,425	110,8	8,1	28,4
60	0,250	57,8	4,2	24,2
140	0,125	68,6	5,0	19,2
200	0,075	38,5	2,8	16,4
Fundo		12,0	0,9	

Total	1.153,5	84,5

3.2.1.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência foram determinados segundo a norma NP 143 – 1969. Nesse sentido, no trabalho foram determinados o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP):

LIMITE DE LIQUIDEZ

O limite de liquidez de uma amostra de solo é obtido através da Concha de Casagrande. A determinação deste limite é somente aplicável a solos com cerca de 30% ou mais, em massa de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm (NP 143).

Entende-se por limite de liquidez o teor em água de cada um de 4 provetes de amostra com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto num provete se unem numa extensão de 1 cm, quando o ensaio é feito na concha de Casagrande. Em termos práticos, este limite é obtido por interpolação de uma curva, que relaciona o teor em água com o número de pancadas obtendo-se o valor de 15%.

LIMITE DE PLASTICIDADE

Tal como o anterior limite, a determinação deste limite, segundo a norma NP-143, é somente aplicável a solos com cerca de 30% ou mais, em massa de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm. O limite de plasticidade representa o teor em água que estabelece o limite entre o comportamento friável e plástico, sendo avaliado pelo teor de água que corresponde à quebra de um filamento cilíndrico com cerca de 3 mm de diâmetro, por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro. Na prática, corresponde à média dos teores de água de 4 provetes. Foi obtido um limite de plasticidade do Solo 1 de 12%.

O índice de plasticidade é calculado através da subtração do limite de liquidez pelo limite de plasticidade:

$$IP = LL - LP = 15 - 12 = 3\%$$

Segundo a Classificação Unificada trata-se de areia siltosa – SM (com cascalho (#4>15%)) e segundo a classificação AASHTO para fins rodoviários, este solo é classificado como A-1-b, grupo de solo de comportamento bom segundo a classificação. Nos ensaios laboratoriais realizados, o solo apresentou um valor de equivalente de areia de 16%.

3.2.1.3. TEOR ÓTIMO DE HUMIDADE

Para a determinação do teor de umidade ótimo, foi utilizado o ensaio de Proctor. Uma amostra de solo foi compactada em várias camadas dentro de um molde cilíndrico, onde cada camada é compactada com um certo número de golpes, com a ajuda de um pilão de peso padrão que também cai de uma altura normalizada. Este ensaio é padronizado pela especificação do LNEC E 197- 1966. Este ensaio permite determinar o peso específico, o peso seco máximo e o teor ótimo de humidade (TOH) do solo compactado.

Na Fig. 13, é apresentada a curva de compactação obtida do Ensaio Proctor que permitiu a determinação do teor ótimo de humidade do solo (4,6%) e baridade seca máxima (2,20 g/cm³).

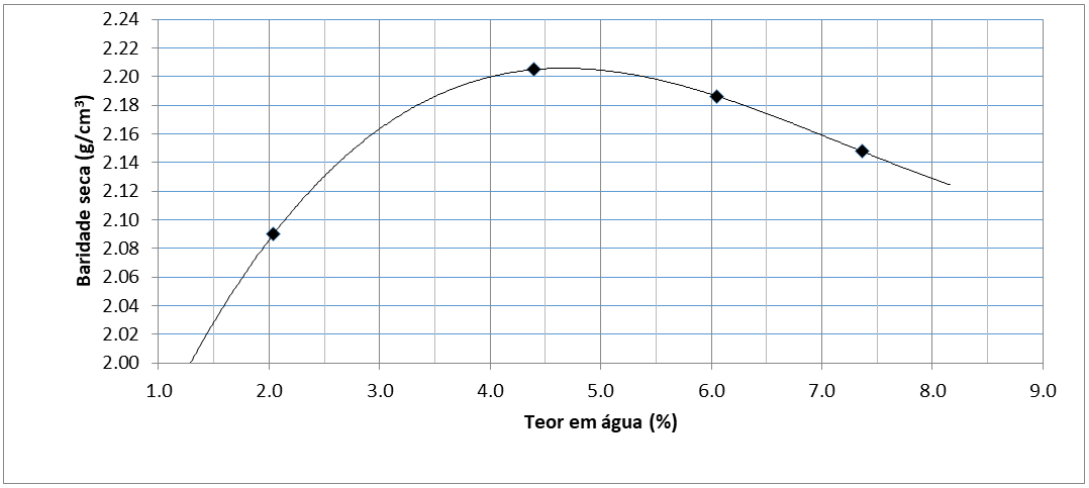


Fig. 13 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 1

3.2.1.4. CBR - CALIFORNIA BEARING RATIO

O Ensaio de CBR é determinado pela relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova de um determinado solo e a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

Na Fig. 14 é apresentado o gráfico de variação do valor de CBR com o grau de compactação do solo de fundação no poço P1. O valor de CBR a usar em dimensionamento deverá corresponder à situação de solo saturado expandido e com grau de compactação máximo 95%. Através do gráfico pode-se verificar que o solo apresenta um valor CBR de 23% para compactação a 95%. A expansão relativa registada foi de 0,0%.

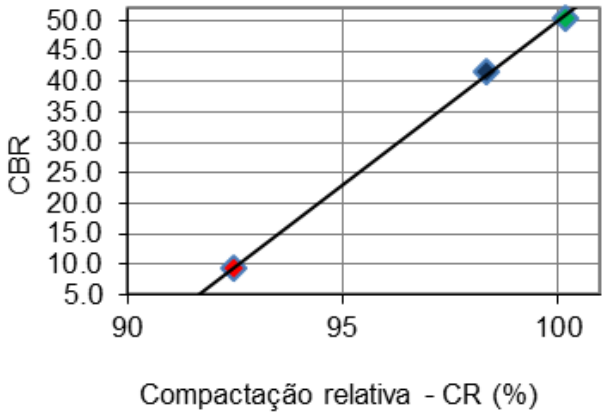


Fig. 14 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo 1

3.2.2. SOLO 2

O poço P2 teve uma dimensão aproximada, em planta, de 70 x 50 cm^2. Na Fig. 15 apresenta-se uma foto do poço durante a sua abertura, onde é possível observar as diferentes camadas constituintes do pavimento – camadas betuminosas, ABGE e solo de fundação do pavimento. Por sua vez, este solo de fundação será denominado de "Solo 2", tendo sido o segundo solo a ser utilizado durante o trabalho laboratorial.



Fig. 15 – Abertura do poço P2

Com a abertura do poço verificou-se que as camadas betuminosas perfazem 21cm de espessura e a camada de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) cerca de 19cm. Abaixo desta camada, entre os 0,32m e 0,55m de profundidade encontramos o solo de fundação do pavimento.

O solo de fundação do pavimento observado neste poço tem uma cor mais avermelhada quando comparado com o P1. Notou-se também presença de mais humidade neste solo e, logo na sua abertura, foi possível perceber que o solo era ligeiramente mais argiloso/plástico que o solo encontrado em P1. O solo observado encontra-se isento de material pétreo, sendo constituído por areia argilosa.

3.2.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na Fig. 16 apresenta-se a curva granulométrica do solo de fundação do solo 2 e, na Tab. 7, a análise granulométrica deste solo e respetivas percentagens de material retido em cada peneiro.

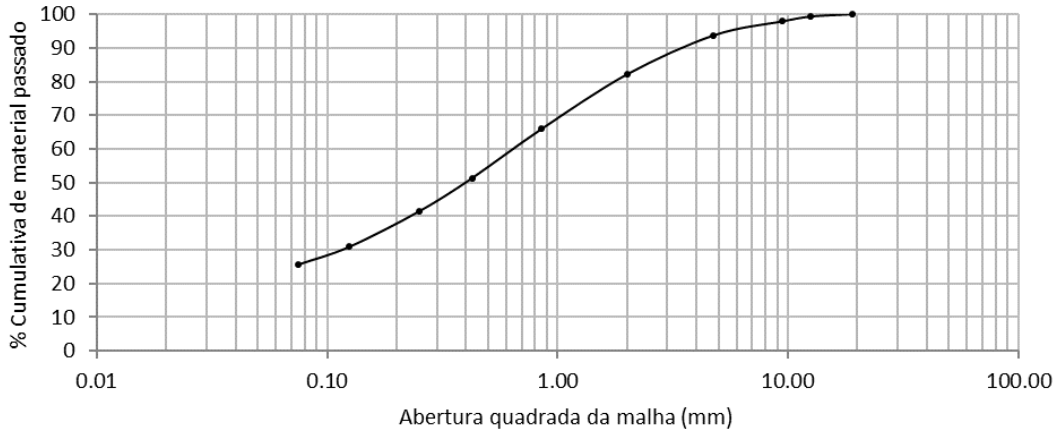


Fig. 16 – Curva granulométrica do Solo 2

Tab. 7 – Análise Granulométrica do Solo 2

Massa seca total, M1	640,9 g
Massa seca após lavagem, M2	482,3 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, M1-M2	158,7 g

Peneiros		Material retido (g)	Material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado
Abertura	mm			
4 “	101,8	0,0	0,0	100,0
2 ”	50,8	0,0	0,0	100,0
1 ”	25,4	0,0	0,0	100,0
3/4 “	19,0	0,0	0,0	100,0
1/2 “	12,5	4,5	0,7	99,3
3/8 “	9,50	8,9	1,4	97,9
4	4,75	27,0	4,2	93,7
10	2,00	74,0	11,5	82,2
20	0,850	104,0	16,2	65,9
40	0,425	93,2	14,5	51,4
60	0,250	63,3	9,9	41,5
140	0,125	67,1	10,5	31,0
200	0,075	33,9	5,3	25,8
Fundo		6,4	1,0	
Total		482,3	75,2	

3.2.2.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

LIMITE DE LIQUIDEZ

O Solo 2 apresenta um limite de liquidez de 22%.

LIMITE DE PLASTICIDADE

Foi determinado um limite de plasticidade de 12%.

Consequentemente, foi calculado novamente um índice de plasticidade através da fórmula:

$$IP = LL - LP = 22 - 12 = 10\%$$

Segundo a Classificação Unificada, trata-se de areia argilosa – SC e, segundo a classificação AASHTO para fins rodoviários, este solo é classificado como A-2-4, grupo de solo de comportamento bom segundo esta classificação. Nos ensaios laboratoriais realizados, o solo apresentou um valor de equivalente de areia de 13%.

3.2.2.3. TEOR ÓTIMO DE HUMIDADE

Na Fig. 17 apresenta-se a curva de compactação obtida do Ensaio Proctor, que permitiu a determinação do teor ótimo de humidade do solo (5,1%) e baridade seca máxima (2,20 g/cm³).

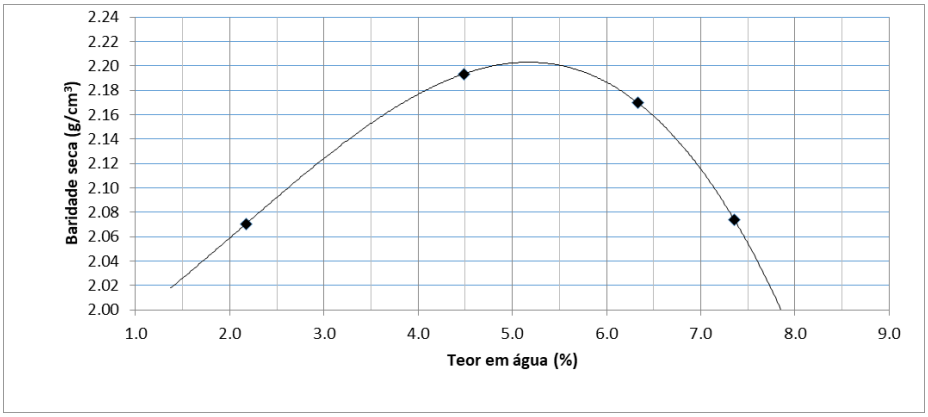


Fig. 17 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 2

3.2.2.4. CBR - CALIFORNIA BEARING RATIO

Na Fig. 18 é apresentado o gráfico de variação do valor de CBR com o grau de compactação do solo de fundação no Poço P2. O valor de CBR a usar em dimensionamento deverá corresponder à situação de solo saturado expandido e com grau de compactação máximo 95%. Através do gráfico pode-se verificar que o solo apresenta um valor CBR de 11% para compactação a 95%. A expansão relativa registada foi de 0,2%.

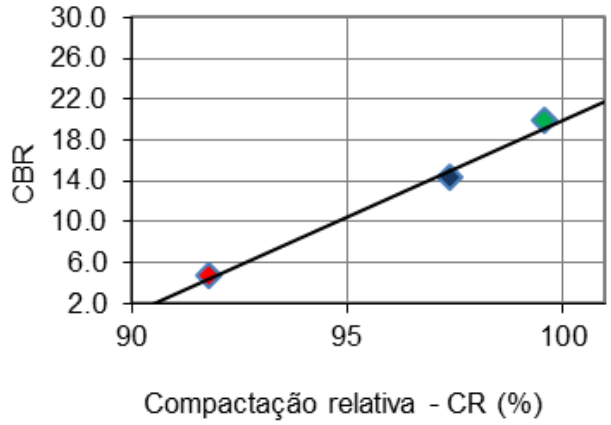


Fig. 18 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo 2

3.2.3. SOLO 3

3.2.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na Fig. 19 apresenta-se a curva granulométrica do solo de fundação do solo 2 e, na Tab. 8, a análise granulométrica deste solo e as respetivas percentagens de material retido em cada peneiro

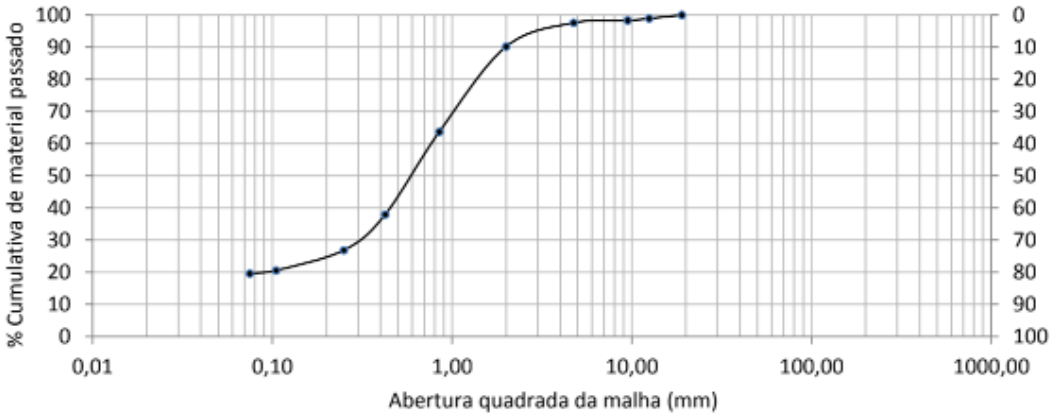


Fig. 19 – Curva granulométrica do Solo 3

Tab. 8 – Análise Granulométrica do Solo 3

Massa seca total, M1	1.122,5 g
Massa seca após lavagem, M2	903,2 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, M1-M2	219,3 g

Peneiros		Material retido (g)	Material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado
Abertura	mm			
4 “	101,8	0,0	0,0	100,0
2 ”	50,8	0,0	0,0	100,0
1 ”	25,4	0,0	0,0	100,0
3/4 “	19,0	0,0	0,0	100,0
1/2 “	12,5	12,2	1,1	98,9
3/8 “	9,50	6,7	0,6	98,3
4	4,75	8,2	0,7	97,6
10	2,00	83,2	7,4	90,2
20	0,850	297,5	26,5	63,7
40	0,425	288,9	25,7	37,9
60	0,250	124,6	11,1	26,8

140	0,125	70,5	6,3	20,5
200	0,075	10,8	1,0	19,6
	Fundo	0,4	0,0	
	Total	903,2	80,5	

3.2.3.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

LIMITE DE LIQUIDEZ

O solo 3 apresenta um limite de liquidez de 26%.

LIMITE DE PLASTICIDADE

O solo 3 apresenta um limite de plasticidade de 12%.

Consequentemente foi calculado novamente um índice de plasticidade através da fórmula:

$$IP = LL - LP = 26 - 12 = 14\%$$

3.2.3.3. TEOR ÓTIMO DE HUMIDADE

Na Fig. 20 é apresentada a curva de compactação obtida do Ensaio Proctor, que permitiu a determinação do teor ótimo de humidade do solo (8,1%) e baridade seca máxima (2,09 g/cm³).

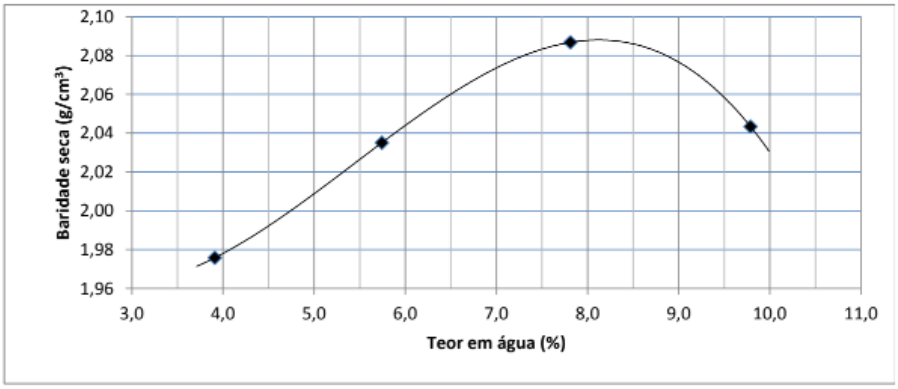


Fig. 20 – Curva do Ensaio de Proctor do Solo 3

3.2.3.4. CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO

Na Fig. 21 é apresentado o gráfico de variação do valor de CBR com o grau de compactação do solo 3. O solo apresenta um valor CBR de 42% para compactação a 100%. A expansão relativa registada foi de 0,1%.

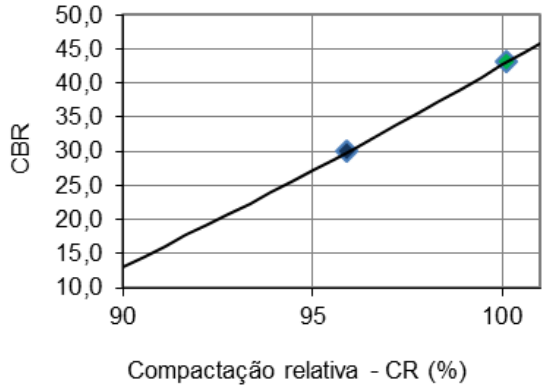


Fig. 21 – Gráfico para determinação do valor de CBR do Solo 3

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA BIOENZIMA UTILIZADA

A bioenzima utilizada foi cedida pela empresa *Green Soils Technologies* (GST), pertencente ao Grupo DP. Este grupo teve a oportunidade, junto com os representantes da marca *Perma-Zyme*, já anteriormente referida, de realizar uma parceria com o intuito de fornecer o produto. O objetivo da parceria passa por experimentar o produto em solos angolanos com o intuito de melhorar as estradas na província do Moxico. Este produto é uma fórmula multi-enzimática líquida concentrada que contem água, compostos orgânicos e outros ingredientes. Tal como os restantes produtores de bioenzimas, também os representantes da *Perma-Zyme* não divulgam a composição da mesma.

A aplicação deste produto não se destina única e exclusivamente a estradas por pavimentar. Segundo produtor de *Perma-Zyme*, a empresa Substrata, existem outro tipo de aplicações do produto como por exemplo, lagos e estradas pavimentadas.

3.3.1. REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA O USO DA BIOENZIMA

Tal como anteriormente referido, as bioenzimas estabilizadoras requerem condições específicas para a sua utilização. Os agregados devem estar em conformidade com os requisitos de uma classificação modificada, como demonstrado na Tab. 9.

Tab. 9 – Requisitos granulométricos para a utilização da bioenzima

Peneiro	Percentagem de passados
1” (25 mm)	100
3/4” (19 mm)	90-100
#1/2 (12,5 mm)	60-85
# 4 (4,75 mm)	50-70
# 8 (2,36 mm)	35-55
# 200 (0,075 mm)	12-20 (coesivo)

O empreiteiro deve fazer ajustes no material que pode incluir, entre outros, o aumento de finos coloidais (argila) ou a redução da quantidade de material que passa pelo peneiro nº 200. Para que a GST seja eficaz, deve existir no mínimo 15% de argila e um índice de plasticidade superior a 7. Paralelamente, é ideal que o solo tenha uma variedade de tamanhos de peneira, como pedras e seixos. A presença deste tipo de granulometria ajudará na resistência do solo, pois este ligar-se-á em torno dos tamanhos maiores e aumentará a resistência do solo curado e a resistência ao corte.

3.3.2. MODO DE APLICAÇÃO DA BIOENZIMA

O modo de aplicação das bioenzimas difere muito pouco de produto para produto. A aplicação da solução GST deve ser limitada à área especificamente modelada e dimensionada para receber a solução.

3.3.2.1. TESTE DE SOLO

Antes de o produto ser aplicado, é necessário realizar testes para a verificação da compatibilidade do solo com o produto, realizando-se, assim, uma análise granulométrica que permite descobrir a percentagem de argila presente no solo. Posteriormente, calcula-se o teor ótimo de humidade do solo, os limites de consistência e o índice de plasticidade.

3.3.2.2. QUANTIDADE DE PRODUTO A SER DILUÍDO

O produto terá de ser aplicado a uma taxa de um litro para 32 metros cúbicos de material a ser tratado. O fabricante diz-nos que dois baldes de 1 9 litros são suficientes para construir uma estrada com um quilómetro de comprimento, sete metros de largura e 15 cm de espessura. A quantidade de água a ser utilizada deve ter em conta o teor ótimo de humidade do solo a ser tratado.

3.3.2.3. APLICAÇÃO DA BIOENZIMA NO SOLO

Para a correta e eficaz aplicação do produto, não poderão ocorrer chuvas durante o período de aplicação e nas 72 horas consequentes, e, por sua vez, a temperatura deverá permanecer acima dos dez graus centígrados.

Os trabalhos deverão ser iniciados com a utilização de uma motoniveladora com escarificador (Fig. 22) para fresar e misturar o solo. De seguida e, após o cálculo da quantidade de produto a ser utilizado, o produto deverá ser misturado com água no interior da cisterna do camião auto-tanque (Fig. 22). Como sugestão, o fabricante afirma que a solução estabilizadora deverá ser adicionada ao tanque depois do mesmo ter o volume apropriado de água, de forma a evitar a criação de espuma dentro da cisterna. De igual modo, afirma também que não é necessária nenhuma mistura. O camião deverá ter um espalhador pressurizado com um velocímetro para garantir uma distribuição uniforme. Após a aplicação do produto no solo é crucial realizar a mistura do solo com o produto pulverizado, e, para isso, poderá ser utilizada novamente a motoniveladora. Este equipamento de mistura deverá seguir a menos de 400 metros atrás do camião cisterna.

O passo seguinte passa pela compactação. O teor de humidade do material no momento de compactação não deve variar mais do que dois pontos percentuais em relação ao teor ideal de humidade. A primeira compactação deverá ser feita por um compactador de pé de carneiro (Fig. 22), uma vez que este

compactador tem maior eficácia em profundidade. Para finalizar a operação de compactação, deve ser utilizado um cilindro vibrador de tambor (Fig. 22), com o objetivo de atingir o nivelamento final da obra. Após esta última compactação, a estrada estará pronta para o tráfego leve e não será comprometida, mas, só após 72 horas, é que esta estará totalmente curada.



Fig. 22 – Motoniveladora com escarificador (sup. esq.), camião auto-tanque (sup. dir.), cilindro pés de carneiro (inf. esq.) e cilindro vibrador de tambor (inf. dir.)

3.3.2.4. OUTRAS APLICAÇÕES DO PRODUTO

Tal como referido anteriormente, para além da aplicação em estadas não pavimentadas, o produto poderá ser aplicado também em estradas pavimentadas e lagos, por exemplo.

As estradas pavimentadas são construídas sobre solos estabilizados e um dos grandes problemas que pode surgir numa estrada deriva do tratamento da base. Neste sentido, através do uso de *Perma-Zyme* poder-se-á reduzir os custos de manutenção das estradas pavimentadas.

Outra possível aplicação é em lagos artificiais, onde, neste caso, o produto irá diminuir as infiltrações, bem como a erosão. Segundo o produtor da bioenzima, esta poderá ser aplicada antes da construção do lago ou até mesmo depois de o mesmo cheio.

3.4. COMPATIBILIDADE ENTRE OS SOLOS E O PRODUTO

Na Tab. 10, e para futuras conclusões sobre os ensaios a realizar, existem alguns valores que se devem salientar, o passado (ac.) peneiro nº200 (%), que nos indica a percentagem de argila no solo, e o índice de plasticidade. Estes valores apresentam relevância, considerando que as principais exigências do nosso produto são a granulometria, a percentagem de argila e o índice de plasticidade.

Tab. 10 – Principais propriedades dos solos utilizados

Solos	1	2	3
Passado (acumulado) peneiro nº4 (%)	59,8	93,7	100,0
Passado (ac.) peneiro nº10 (%)	47,7	82,2	90,2
Passado (ac.) peneiro nº 40 (%)	28,4	51,4	37,9
Passado (ac.) peneiro nº200 (%)	16,4	25,8	19,6
Limite de liquidez (%)	15	22	26
Índice de plasticidade (%)	3	10	12
Baridade seca máxima (%)	2,29	2,20	2,09
Teor ótimo de humidade (%)	4,6	5,1	8,1

Enquanto o solo 1 se enquadra perfeitamente nas exigências granulométricas requeridas e na percentagem de argila (16,4%), já ao nível da plasticidade deixa aquém do requerido (3% < 7% requerido).

Apesar de algumas falhas na granulometria exigida, o solo 2 enquadra-se nos parâmetros de percentagem de argila, mas, ainda assim, apresenta um valor um pouco mais elevado (25,8%). Por sua vez, o nível de índice de plasticidade apresenta-se dentro do exigido (10% > 7% requerido).

O solo 3 foge um pouco no que diz respeito à granulometria, considerado que é um solo muito fino. Em relação à percentagem de argila e ao índice de plasticidade, os valores estão dentro do exigido, 19,6% e 12%, respetivamente.

4
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará o planeamento dos ensaios realizados para os solos 1, 2 e 3 e, posteriormente, a caracterização dos procedimentos laboratoriais. De igual modo, será realizada uma descrição dos materiais e dos equipamentos utilizados, bem como o modo de preparação das amostras e da solução estabilizadora. Complementarmente, são relatados os ensaios de compressão em prensa Marshall e SEM realizados para os solos 1 e 2 e, por sua vez, o ensaio CBR para o solo 3. Adquirido numa fase mais tardia dos ensaios, o solo 3 foi ensaiado à posteriori. Por fim, é realizada uma breve descrição do ensaio SDS-PAGE realizado à bioenzima.

4.2. SOLO 1 E 2

4.2.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

No presente trabalho, foram considerados dois tipos diferentes de dosagens de bioenzima – dosagem recomendada e a dosagem duas vezes o recomendado). Para cada teor, realizou-se 12 provetes - seis provetes tratados e seis provetes para o controlo. De cada conjunto de seis provetes, tanto tratados como de controlo, três com o objetivo de serem ensaiados aos 7 dias e outros três para ensaios aos 14 dias.

4.2.1.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para os provetes serem preparados, com e sem a presença de bioenzimas, foram necessários os seguintes equipamentos:

- Moldes;
- Máquina de compactação;
- Tabuleiro;
- Espátula;
- Mini pá;
- Balança (limite de erro: 0,01g);
- Papel de filtro.
- Micropipeta (5-50 μL)

4.2.1.2. PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES ESTABILIZADORAS

A solução estabilizadora é preparada através da mistura do produto com água. Para a preparação das misturas, foi necessário determinar o teor ótimo de humidade dos solos e, a partir daí, calcular a quantidade de solução a adicionar à água para perfazer esse teor.

A quantidade de solução a utilizar nos provetes é calculada segundo os requisitos do produto. Tal como podemos ver na Fig. 23 , o provete utilizado tem 5cm de raio e 7 cm de altura, ou seja, 549,5 cm³ de volume. Após pequenos cálculos, o valor a adicionar de bioestabilizador é de 17,1 µl, como observável na Tab. 11.

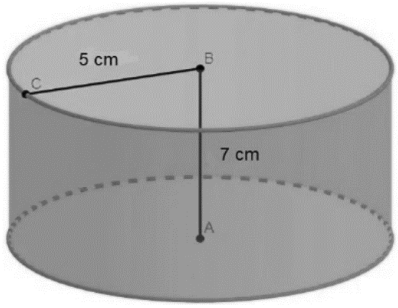


Fig. 23 – Esquema ilustrativo do provete

Tab. 11 – Dosagem de GST a utilizar

GST	Solo
1 l	32 m³
17,1 µl	0,00055 m³

A quantidade de produto anteriormente calculada tem de ser diluída em água até obtermos o teor ótimo de humidade de cada solo. Na Tab. 12, apresenta-se o teor ótimo de água, o volume de água adicionada a cada um dos solos e a quantidade de enzima utilizada.

Tab. 12 – Constituição dos provetes utilizados nos ensaios de compressão em prensa Marshall

Solo	Teor ótimo de humidade	Volume de água adicionado	Volume de enzima	Nº de Provetes
1	4,6%	46 ml	0,0	6
1	4,6%	46 ml	0,0171	6
1	4,6%	46 ml	0,0342	6
2	5,1%	51 ml	0,0	6
2	5,1%	51 ml	0,0171	6
2	5,1%	51 ml	0,0342	6

4.2.1.3. MONTAGEM DOS PROVETES DE SOLO

Considerando a especificação do LNEC E198-196, os provetes com solução enzimática e os provetes de controlo são montados utilizando moldes com 101,6mm de diâmetro (D) e 80mm de altura (h) com uma alonga com 103,6 mm de diâmetro e 71,4 mm de altura. Os moldes têm uma alonga que ajuda não só na colocação do solo dentro do molde, como também no processo de compactação. Para a montagem dos nossos provetes foi seguido o seguinte procedimento, apresentado na Fig. 24:

1. Mistura manual homogénea de 100g de solo com a solução aquosa num tabuleiro: tanto os provetes preparados com solução estabilizadora, como os de controlo, foram preparados seguindo o procedimento.
2. Colocação da mistura no molde com auxílio da pá: com auxílio de uma pá, foi colocada a mistura anteriormente preparada dentro dos moldes. Após a colocação, o solo foi remexido com uma espátula para um melhor acondicionamento. Posteriormente, o material foi protegido com papel de filtro em ambas as extremidades.
3. Compactação do solo: a compactação foi realizada através de um compactador para ensaios Marshall da Controls. A compactação efetuou-se com 12 pancadas em cada face do provete.
4. Retirar o provete do molde, pesar, tirar as medidas e armazenar: o provete foi retirado do molde com auxílio do pilão da máquina de compactação e colocado em tabuleiros para armazenamento.

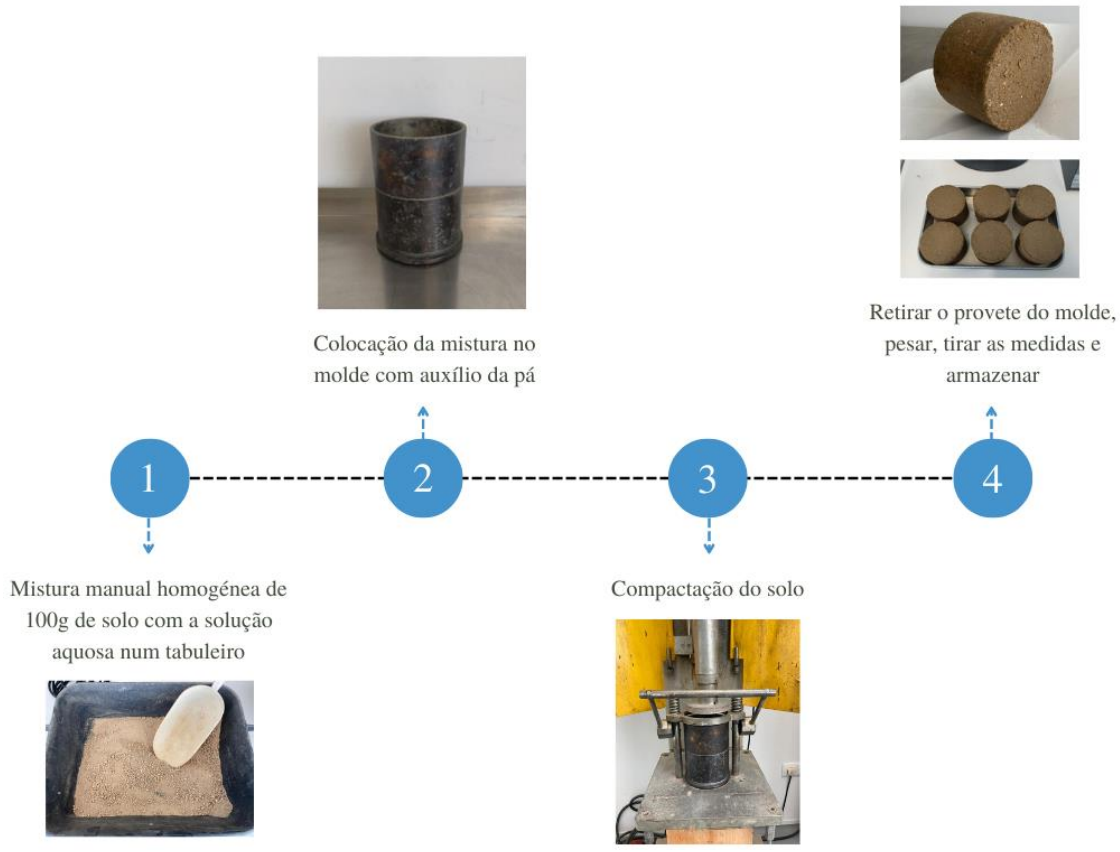


Fig. 24 – Esquema de montagem dos provetes

4.2.2 Ensaio Realizados

Numa primeira fase foram realizados o ensaio de compressão em prensa Marshall e o ensaio SEM para o solo 1 e 2. Para o nosso produto, foi realizado o ensaio SDS-PAGE.

4.2.2.1. Ensaio de compressão em prensa Marshall

Esta investigação contemplou a realização de ensaios com a prensa Marshall para avaliação dos parâmetros mecânicos, podendo-se, assim, concluir a eficiência do processo de bioestabilização. Apesar de não se constituir um ensaio indicado para solos, optou-se pela realização do mesmo por se estabelecer como a única possibilidade aquando do início dos trabalhos. Estes ensaios foram realizados numa prensa Marshall, modelo 34-T0107 (Fig. 25).

Antes do tratamento dos solos, foi possível realizar os ensaios CBR, porém a sua não realização após a aplicação das bioenzimas deve-se à inexistência da quantidade suficiente de material.



Fig. 25 – Prensa Marshall modelo 34-T0107

Após a calibração do transdutor de deslocamento e da célula de carga, o procedimento para o ensaio o seguinte:

1. Medição da altura e diâmetro do provete.
2. Colocação do provete na mandíbula do dispositivo Marshall, alinhando o eixo da mesma com a célula de carga por forma a aplicar uma carga no eixo do provete.
3. Aproximação da mandíbula o máximo possível da célula de carga, sem que seja aplicada força no provete.
4. Iniciação (colocação a zero) do deslocamento (transdutor do deslocamento) e da força (célula de carga).
5. Início do ensaio com uma velocidade de deformação de 2 mm por minuto.
6. Registo de forma automática dos valores de força e deslocamento, através do software *Controls*.
7. Fim do ensaio após ser atingido o valor de carga máximo, ou seja, quando o valor medido pela célula de carga diminui ou estabiliza num determinado valor.
8. Gravação dos dados obtidos através do software.

9. Remoção do provete e armazenamento do mesmo para a realização de ensaios SEM.

Finalizado o ensaio e após serem obtidos os dados do software da *Controls*, é necessário o tratamento dos dados. Nos ensaios com prensa Marshall existem "*bedding errors*" que surgem devido ao ajuste da mandíbula de Marshall ao provete. Como exemplificado no gráfico da Fig. 26, este erro é caracterizado por uma zona inicial concava. De acordo com a norma europeia EN12697-34, de forma a eliminar estes erros, corrigem-se os valores através de uma tangente ao gráfico como podemos ver na mesma figura. No gráfico seguinte da Fig. 27 encontra-se um exemplo de uma correção de um gráfico onde a linha tangente se encontra marcada a verde.

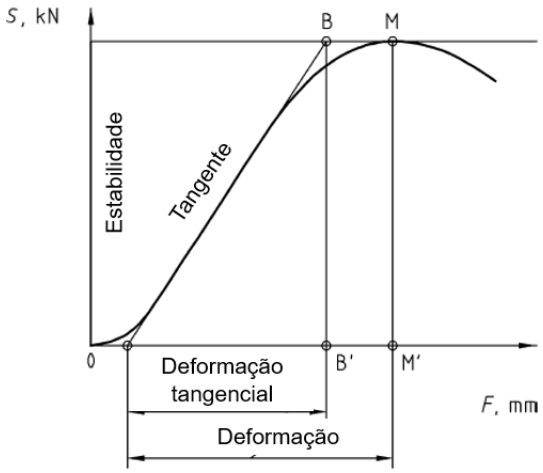


Fig. 26 – Correção da curva Marshall

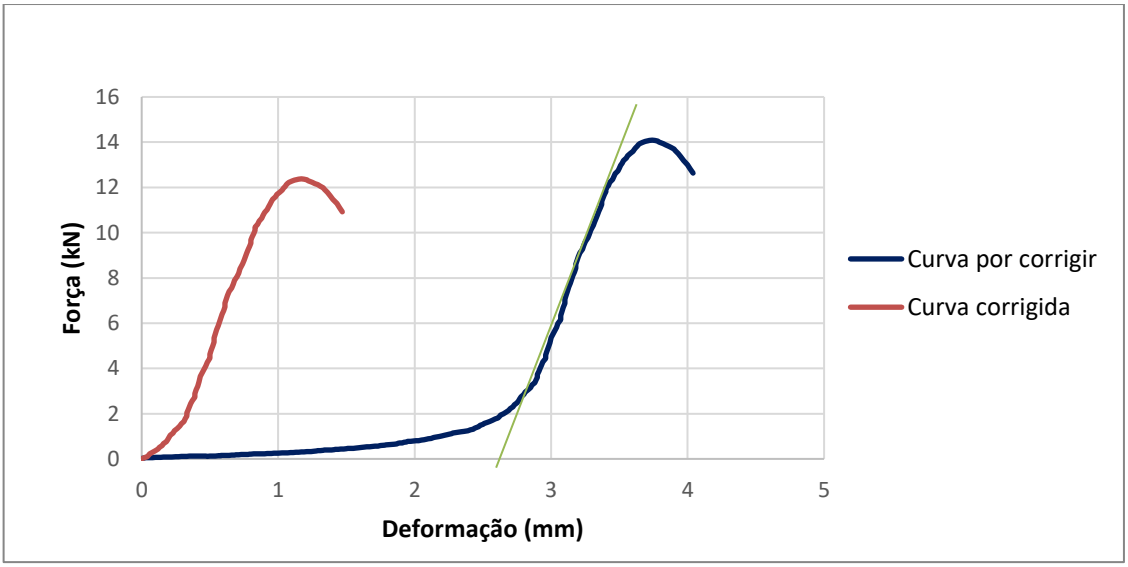


Fig. 27 – Exemplo de correção da curva Marshall

4.2.2.2. ENSAIOS SEM (SCANNING ELECTRON MICROSCOPES)

Os ensaios SEM foram realizados com o propósito de confirmar a formação do precipitado de $CaCO_3$ nos provetes ensaiados através ampliação de imagens. Neste sentido, foram analisados os dois solos com os três teores diferentes, sem enzima, com o recomendado e com o dobro do recomendado, aos 14 dias. Para a realização dos ensaios SEM, utilizou-se um microscópio eletrónico, pertencente à Universidade de Aveiro, que permitiu obter imagens a partir do varrimento de um raio de eletrões pela amostra.

Este processo é iniciado com aplicação de uma camada de ouro (Au), em vácuo, à amostra, aumentando a sua capacidade condutora. Após a preparação da amostra, esta é colocada no microscópio, onde é induzido o vácuo. Posteriormente, procede-se à recolha dos perfis topográficos.

4.2.2.3. ENSAIO SDS-PAGE (ELETROFORESE DESNATURANTE EM GEL DE POLIACRILAMIDA)

A realização do ensaio SDS-PAGE teve como objetivo avaliar o conteúdo proteico de uma amostra da bioenzima em estudo, de forma a verificar se o produto continha enzimas. Nesse sentido, foram recolhidas duas amostras da embalagem, uma do fundo e outra da parte superior.

Nestes ensaios, as amostras foram carregadas com o gel de resolução SDS-PAGE (4-20%; Mini-Protean TGX Precast Gel, ref 456-1093, Bio-Rad) e a eletroforese foi realizada a uma tensão de 220 (58mA→31mA) volts durante 55 minutos. As amostras não foram quantificadas, tendo sido aplicado volumes de 5 e 10 uL, para análise quantitativa.

Para este ensaio foram recolhidas duas amostras do produto em dois momentos distintos, sendo retirado em cada um dos momentos uma amostra do fundo e outra do topo. Este ensaio foi realizado pelo Departamento de Biologia & CESAM da Universidade de Aveiro.

As amostras foram numeradas de 1 a 8, 4 antigas e 4 "frescas", divididas por topo e fundo, conforme observável na Tab. 13, sendo as amostras classificadas como "frescas" as mais recentes. Na mesma tabela, são demonstradas as quantidades de volume do produto aplicados no ensaio.

Tab. 13 – Caracterização das amostras recolhidas

Amostra	Fundo/Topo	Antiga/Fresca	Volume utilizado
1	Fundo	Fresca	5 uL
2	Topo	Fresca	5uL
3	Topo	Antiga	5uL
4	Fundo	Antiga	5uL
5	Fundo	Fresca	10uL
6	Topo	Fresca	10uL
7	Topo	Antiga	10uL
8	Fundo	Antiga	10uL

4.3. SOLO 3

4.3.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

As amostras para este ensaio foram preparadas segundo a especificação E 198-1967 do LNEC. Na preparação dos provetes com bioenzimas, foi utilizada uma única dosagem de solução, a recomendada, para a realização desde ensaio.

4.3.1.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a preparação dos provetes de solo 3, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Molde para ensaio CBR;
- Pilão de compactação
- Tabuleiro;
- Mini pá;
- Balança (limite de erro: 0,01g);
- Papel de filtro.
- Micropipeta (5-50 µL)

4.3.1.2. PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES ESTABILIZADORAS

Enquanto nos solos 1 e 2 foram utilizadas duas concentrações diferentes de solução estabilizadora, neste ensaio utilizou-se somente a recomendada. Tendo o provete 0,00289 m^3, facilmente se faz as proporções para a quantidade de produto necessário.

GST	Solo
1 l	32 m^3
70 µl	0,002289 m^3

4.3.1.3. MONTAGEM DOS PROVETES DE SOLO

Para este ensaio, foram montados 2 provetes de controlo e 2 provetes com bioenzimas.

Os provetes com solução enzimática e os provetes de controlo são montados usando moldes cilíndricos com 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura munidos de uma alonga com 50 mm de altura, conforme a especificação E 198-1967 do LNEC. Para a montagem dos provetes foi seguido o seguinte procedimento:

1. Seca-se a amostra ao ar, espalhando-a num tabuleiro. Com o auxílio de um pilão, desfazem-se os torrões, tendo cuidado de não reduzir o tamanho natural das partículas.
2. Passa-se a amostra no peneiro de malha 50,8 mm e retira-se o material retido.
3. Divide-se a amostra até obter a quantidade de solo necessário para três provetes.
4. Mistura-se cada uma dessas frações com a quantidade de água ou solução estabilizadora correspondente ao teor ótimo de água.
5. Compacta-se as diferentes frações efetuando as seguintes operações:
   - Coloca-se o espaçador sobre a base do molde e aperta-se nesta o molde com a alonga colocada. Sobre o espaçador coloca-se uma folha de papel de filtro grosso;
   - Divide-se o solo em cinco partes iguais;

- Coloca-se no molde uma das cinco partes e compacta-se com o pilão aplicando 25 ou 55 pancadas por camada;
- Repete-se a operação até completar as cinco camadas;

6. Retira-se a alonga e rasa-se cuidadosamente o molde.
7. Retira-se o provete do molde e armazena-se.

4.3.2. ENSAIO CBR

Tal como referido anteriormente, este solo foi disponibilizado apenas no fim dos trabalhos, tendo sido feito este ensaio só aos 3 dias após aplicação do produto. Estes 3 dias não se torna de todo desadequado, uma vez que o fabricante afirma que o solo se encontra curado totalmente ao fim de 3 dias (72 horas), podendo circular tráfego pesado.

Após a preparação dos provetes, o ensaio segue o seguinte procedimento da especificação E 198-1967 do LNEC:

1. Mete-se o conjunto de provetes no tanque de embebição, tendo o cuidado que a água possa entrar pela base perfurada.
2. Sobre o provete, coloca-se a placa de carga e o tripé com defletómetro. O número de placas de carga será o suficiente para reproduzir aproximadamente a pressão devida ao peso do pavimento. Este número nunca pode ser inferior a dois.
3. Efetua-se a leitura inicial do defletómetro e deita-se água no tanque até atingir um nível ligeiramente acima do bordo do molde.
4. Após algumas horas de embebição, retira-se o tripé com defletómetro e esgota-se a água do tanque e do interior do molde com algum cuidado para não danificar o provete. Retira-se o molde do tanque e deixa-se drenar o provete por 15 minutos. Pesa-se o molde para determinar a baridade e o peso de água absorvida.
5. Coloca-se a placa de carga em forma de anel no topo do provete e instala-se o molde na prensa bem centrado e ajusta-se o pistão. Para terminar este passo, colocam-se as restantes placas até atingir o número especificado no ponto 2.
6. Carrega-se o provete através do pistão com uma força de 5 kgf, levando-se o dispositivo de leitura de forças a zero. Posteriormente, instala-se o defletómetro para leitura da deformação do provete.
7. Aplica-se a força do pistão à velocidade uniforme de penetração de 1mm / minuto.
8. Regista-se a leitura das forças de penetrações de 0,5, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0, 7,5, 10,0 e 12,5 mm. Por norma, dispensa-se as últimas duas leituras.
9. Retira-se o molde da prensa e determina-se o teor em água do provete de duas amostras recolhidas a 1 cm de cada topo.

5
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

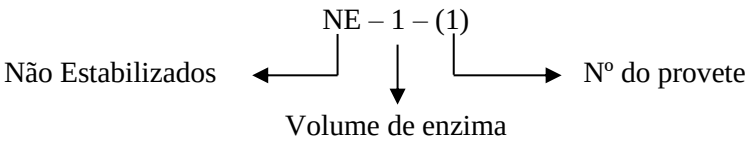
No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos, sendo discutida a influência da bioenzima nos resultados obtidos nos ensaios de compressão com prensa Marshall e nos ensaios SEM nos solos 1 e 2, bem como os resultados do ensaio CBR do solo 3, obtido numa fase final dos trabalhos.

5.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO EM PRENSA MARSHALL

5.2.1. RESULTADOS CORRIGIDOS DO ENSAIO

Na Tab. 14 e na Tab. 15 apresentam-se, já corrigidos, os resultados dos ensaios à compressão em prensa Marshall do solo 1 e 2, respetivamente, encontrando-se assinalada a máxima força aplicada e a deformação correspondente.

Os provetes são identificados de acordo com a seguinte nomenclatura:



Relativamente à nomenclatura, o volume de bioenzima é caracterizado da seguinte forma:

- 0 - Controlo
- 1 - Recomendado
- 2 - 2 x Recomendado

Neste contexto, importa referir a existência de dois provetes que não foram contabilizados para fazer médias e um provete do qual não obtivemos dados devido a um problema de *software*. Assim, na Tab. 14, o provete NE-0-4 é um "*outsider*" devido à grande força aplicada, o que faria com que as médias fossem díspares, o E-2-15 danificou ao colocar na mandíbula e o provete E-1-11 foi o provete do qual não obtivemos os resultados. No que se refere à Tab. 15, existe um provete do qual também não obtivemos resultados, o NE-0-3.

Tab. 14 – Forças máximas e deformações correspondentes do Solo 1

Dias	Provete	Máxima Força (Kn)	Deformação (mm)
7	NE-0-1	10,15	1,32
	NE-0-2	9,63	1,25
	NE-0-3	9,55	1,29
14	~~NE-0-4~~	~~18,47~~	~~1,4~~
	NE-0-5	13,52	1,34
	NE-0-6	12,43	1,25
7	E-1-7	9,49	1,18
	E-1-8	11,85	1,24
	E-1-9	11,93	1,85
14	E-1-10	13,11	1,3
	~~E-1-11~~	~~-~~	~~-~~
	E-1-12	13,09	1,54
7	E-2-13	9,12	1,62
	E-2-14	10,4	1,43
	~~E-2-15~~	~~8,00~~	~~2,549~~
14	E-2-16	12,74	1,19
	E-2-17	12,19	1,69
	E-2-18	11,77	2,16

Tab. 15 – Forças máximas e deformações correspondentes do Solo 2

Dias	Provete	Máxima Força (Kn)	Deformação (mm)
7	NE-0-1	10,47	1,61
	NE-0-2	9,62	1,89
	~~NE-0-3~~	-	-
14	NE-0-3	13,95	2,11
	NE-0-4	12,38	1,17
	NE-0-5	11,69	1,19
7	E-1-6	9,63	1,57
	E-1-7	9,48	1,96

Dias	Provete	Máxima Força (Kn)	Deformação (mm)
	E-1-8	9,99	2,14
14	E-1-9	13,74	1,29
	E-1-10	11,67	1,46
	E-1-11	12,65	1,61
7	E-2-12	9,54	1,4
	E-2-13	7,79	1,83
	E-2-14	10,21	2,32
14	E-2-15	12,87	1,91
	E-2-16	11,64	1,52
	E-2-17	12,56	1,25

5.2.2. MÉDIAS DAS FORÇAS E DEFORMAÇÕES OBTIDAS

A partir dos valores apresentados em 5.2.1. foram calculadas as médias das forças aplicadas e das respetivas penetrações, obtendo os resultados apresentados na Tab. 16.

Tab. 16 – Médias das forças e deformações máximas

Solo 1		Força (KN)	Deformação (mm)
7 dias	Controlo	9,78	1,29
	Recomendado	11,09	1,42
	2 x Recomendado	9,76	1,53
14 dias	Controlo	12,975	1,295
	Recomendado	13,10	1,42
	2 x Recomendado	12,23	1,68
Solo 2		Força (KN)	Deformação (mm)
7 dias	Controlo	10,045	1,750
	Recomendado	9,70	1,89
	2 x Recomendado	9,18	1,85
14 dias	Controlo	12,67	1,49
	Recomendado	12,69	1,45
	2 x Recomendado	12,36	1,56

Observando as deformações do solo 1, dos 7 para os 14 dias, não é possível tirar qualquer conclusão, considerando que os valores se mantêm semelhantes. Por sua vez, no solo 2 existe uma melhoria nas deformações, algo que poderá ser explicado pelo tempo de cura dos provetes.

No que diz respeito às médias das forças aplicadas, comparando os três resultados aos 7 ou aos 14 dias do solo 1, representados na Fig. 28, não é possível tirar conclusões óbvias, uma vez que a força máxima aplicada é semelhante nos três teores.

Relativamente ao solo 2, como observável na Fig. 29, aos 7 dias, os resultados são negativos, pois o valor da estabilidade é menor após aplicação das bioenzimas.

Tanto no solo 1 como no solo 2, existe um ligeiro incremento das forças máximas aplicadas dos 7 para os 14 dias, algo que é explicado devido ao tempo de cura dos provetes.

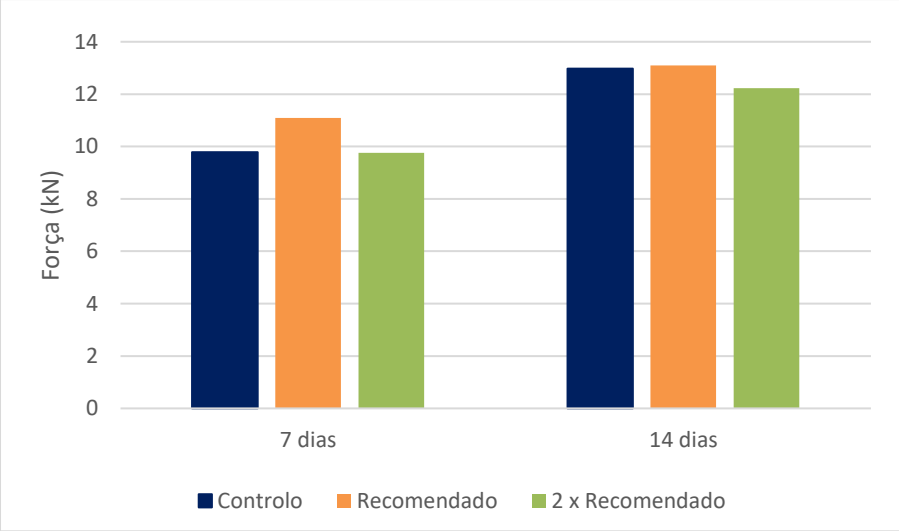


Fig. 28 – Comparação das forças máximas do solo 1

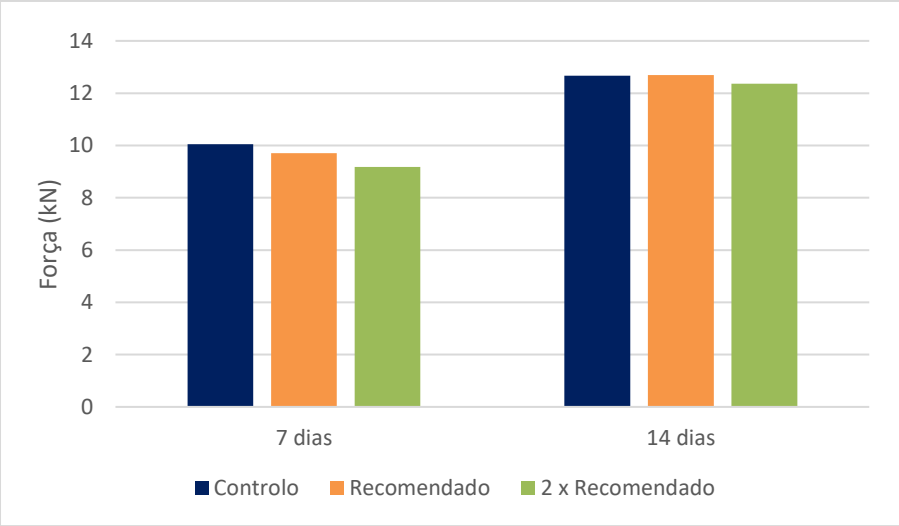
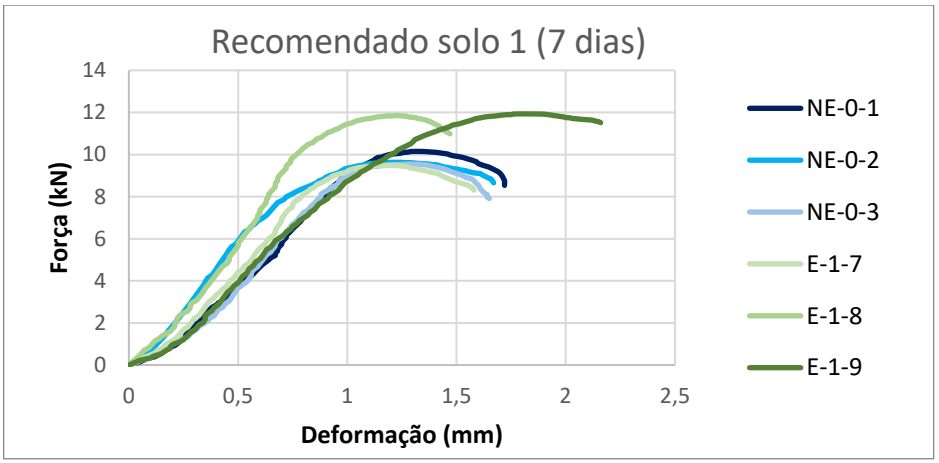


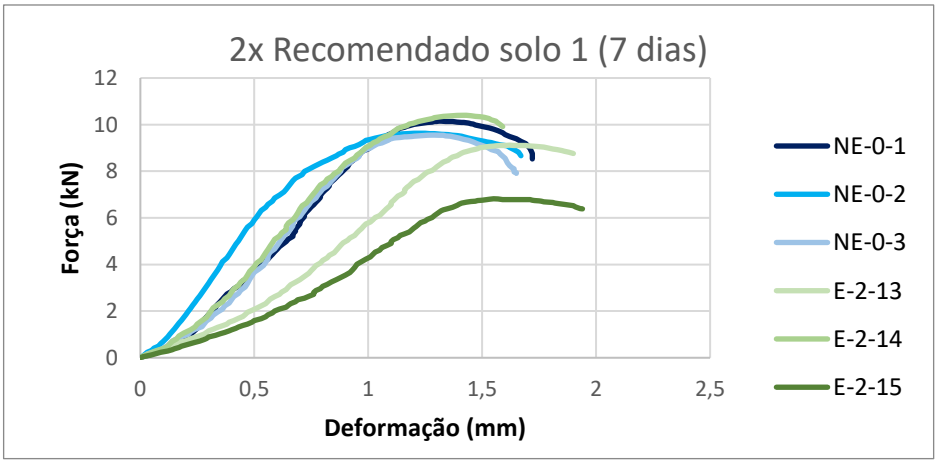
Fig. 29 – Comparação das forças máximas do solo 2

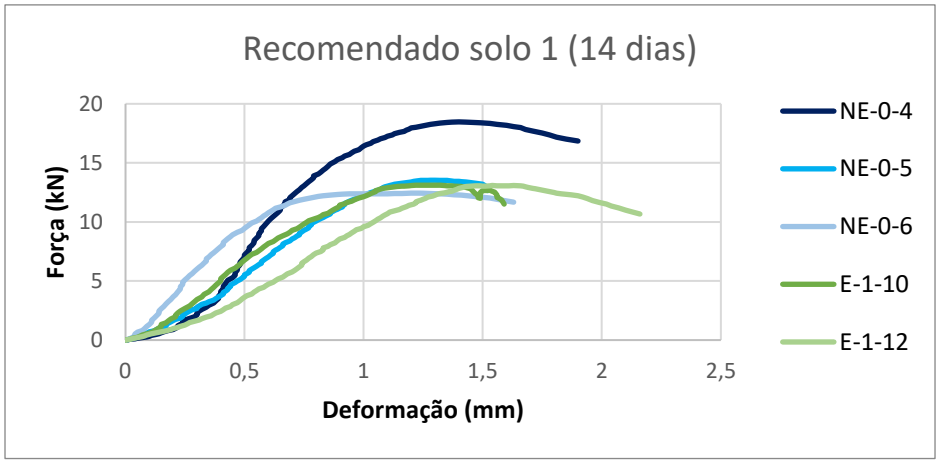
5.2.3. COMPORTAMENTO FORÇA-DEFORMAÇÃO

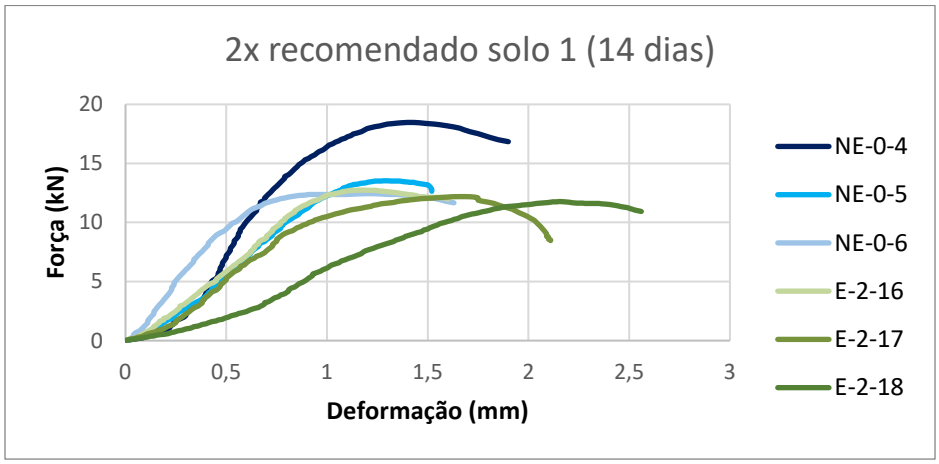
Na Fig. 30 apresentam-se as curvas força-deformação referentes ao ensaio de compressão em prensa Marshall. Estas representações demonstram graficamente o que referimos anteriormente, as melhorias a nível da resistência nem sempre acontecem e, quando acontecem, não são significativas.

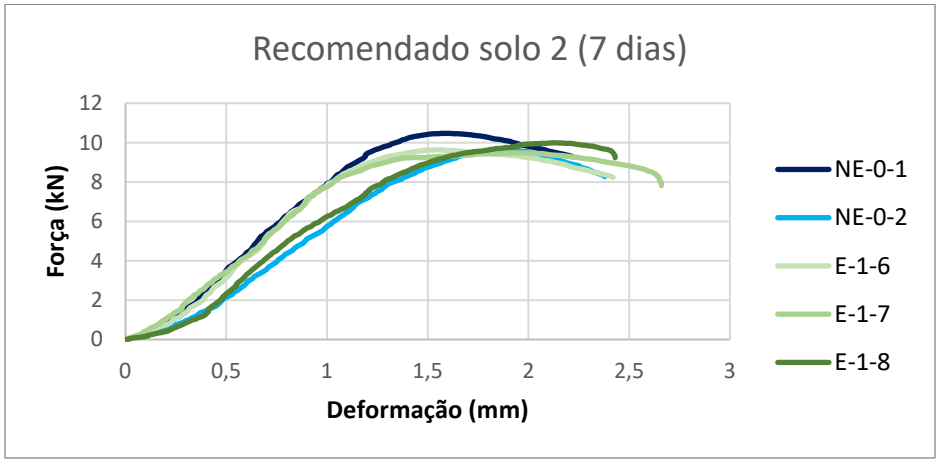
O ensaio Marshall é utilizado em misturas betuminosas e não em solos, e, apesar de ser um ensaio bastante utilizado, são vários os estudos que reconhecem as suas limitações. Um estudo feito na Universidade de Nottingham comparou as propriedades mecânicas de várias misturas, utilizando testes triaxiais de carga repetida, testes triaxiais de fluência, testes de fluência não confinada uniaxial e testes Marshall. O resultado deste estudo refere que o teste Marshall é um indicador pobre de resistência à deformação permanente e não classifica as misturas por ordem da sua resistência à deformação [32].

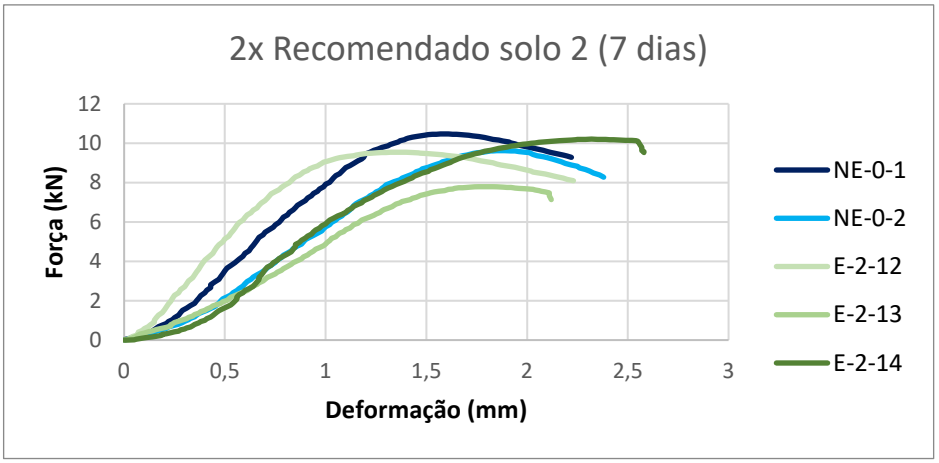


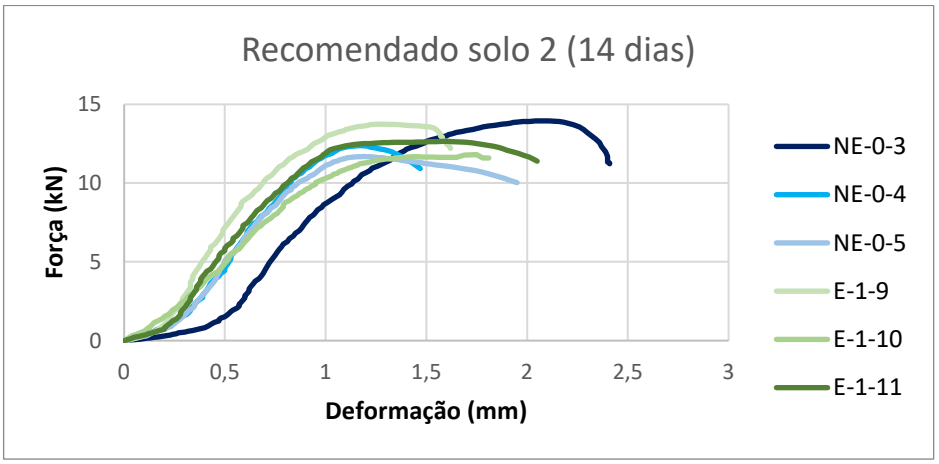



Recomendado solo 1 (14 dias)
Força (kN)
Deformação (mm)
NE-0-4
NE-0-5
NE-0-6
E-1-10
E-1-12


2x recomendado solo 1 (14 dias)
Força (kN)
Deformação (mm)
NE-0-4
NE-0-5
NE-0-6
E-2-16
E-2-17
E-2-18


Recomendado solo 2 (7 dias)
Força (kN)
Deformação (mm)
NE-0-1
NE-0-2
E-1-6
E-1-7
E-1-8





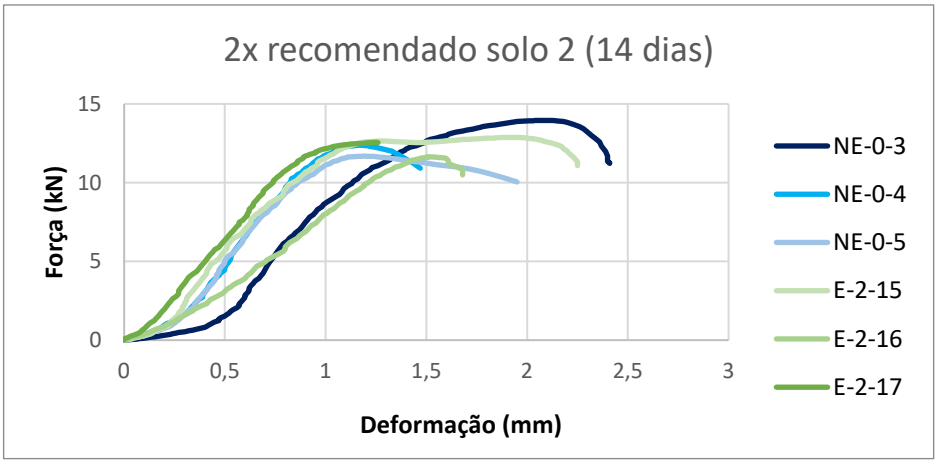


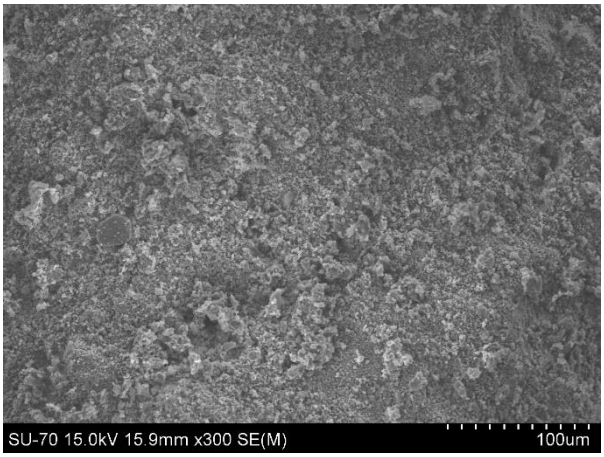
Fig. 30 – Curvas força-deformação dos ensaios de compressão em prensa Marshall

5.3. ENSAIO SEM

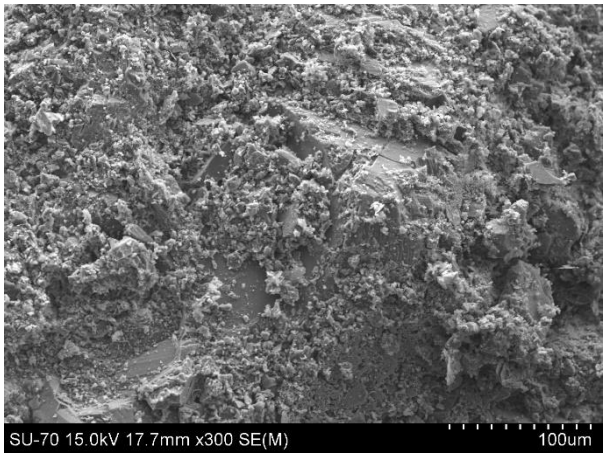
Estes ensaios foram realizados com o intuito de verificar a formação de precipitado de $CaCO_3$, tendo sido subtidos a ensaio 3 provetes de cada solo com 3 diferentes teores de bioenzima.

A Fig. 31 e a Fig. 32 apresentam três imagens SEM de três provetes - um de controlo (i), um com o teor recomendado de bioenzimas (ii) e outro com o dobro do recomendado (iii) - do solo 1 e 2.

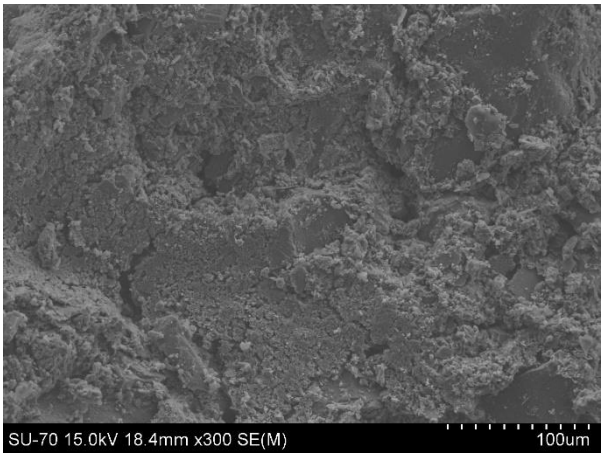
Analisando as imagens verifica-se que houve formação de carbonato de cálcio em redor das partículas. Estes cristais formam pontes de ligação entre as partículas de solo, levando ao aumento de resistência e rigidez do solo estabilizado.



i)

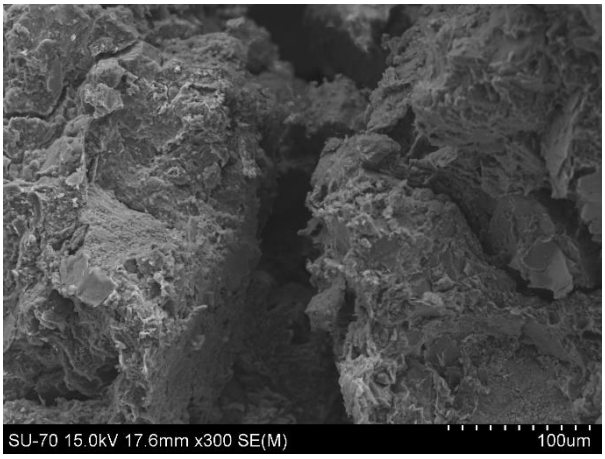


ii)

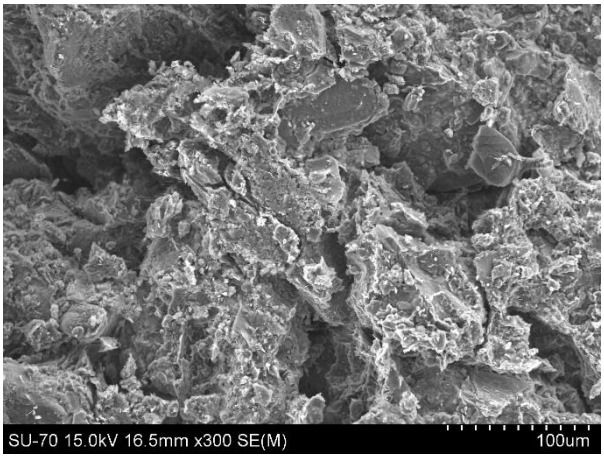


iii)

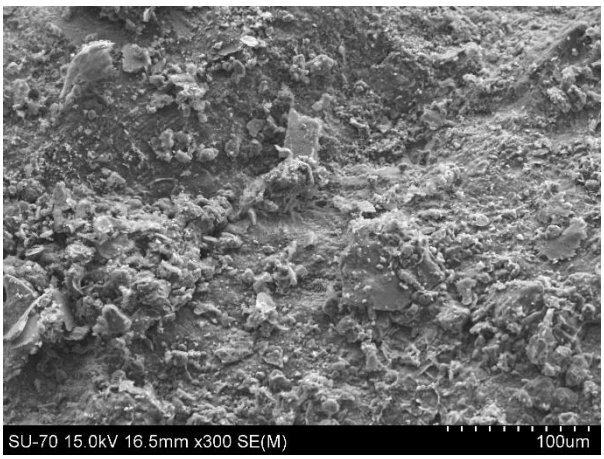
Fig. 31 – Ensaio SEM do solo 1



i)



ii)



iii)

Fig. 32 – Ensaio SEM do solo 2

5.4. ENSAIO SDS-PAGE

Estas amostras foram testadas em laboratório e os resultados foram os ilustrados na Fig. 33. Nesta figura, encontra-se marcado o MW, o marcador de pesos moleculares, com o objetivo de estimar o peso molecular da nossa amostra.

Nem em todas as amostras recolhidas foi explicita a presença de proteínas, porém é possível verificar, através das manchas na figura, que as amostras 1, 4, 5 e 8 contêm proteínas. Nesse sentido, estimou-se o peso molecular de cada uma destas quatro amostras e, através de uma média, descobriu-se o peso molecular da nossa proteína, tendo obtido um valor de 53,9 ± 2,3 kDa. Todas estas quatro amostras são do fundo, o que nos diz que a concentração do produto bioenzemático deve estar na parte de baixo da embalagem.

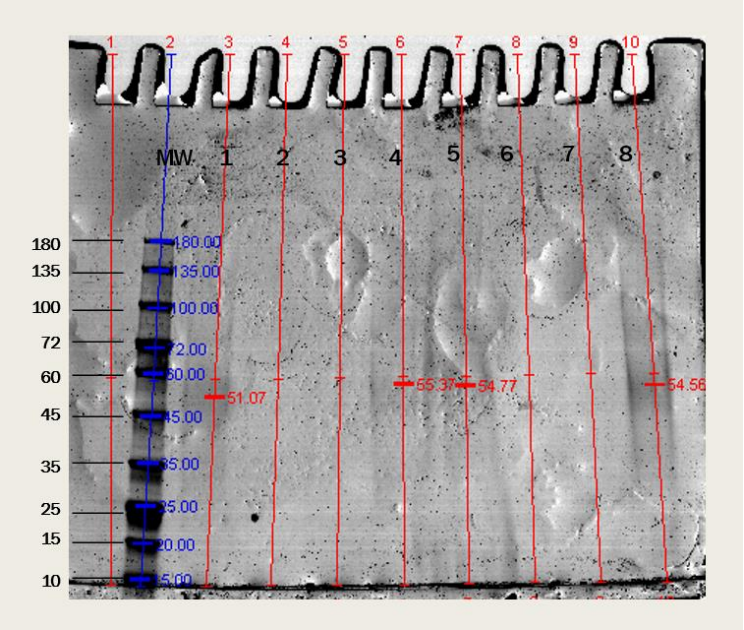


Fig. 33 – Resultado do ensaio SDS-PAGE

5.5. ENSAIO CBR

5.5.1. TRAÇADO DA CURVA FORÇA-PENETRAÇÃO

Após o ensaio de penetração foram traçadas as curvas força-penetração. O valor do CBR determina-se dividindo as forças corrigidas correspondentes às penetrações 2,5 e 5,0 mm, pelas forças normalizadas de 1355 e 2033 kgf e multiplicando os valores obtidos por 100. Toma-se, normalmente, como valor de CBR do solo o resultado correspondente à penetração 2,5 mm, porém se o valor da penetração de 5,0 mm for superior e após repetição do ensaio, toma-se o mesmo como resultado do ensaio de CBR.

Para o cálculo do valor de CBR para uma compactação relativa de 95% consideram-se os provetes elaborados com 25 pancadas. Na Fig. 34 encontram-se representados os traçados das curvas tensão-deformação, já corrigidas, desses mesmos provetes. Os valores utilizados para a sua elaboração apresentam-se no anexo A1. Leituras do ensaio CBR para provetes compactados com 25 pancadas.

Dado que o valor da penetração de 5,0 mm é superior ao valor de 2,5 mm, toma-se o valor do CBR do solo correspondente à penetração de 5,0 mm.

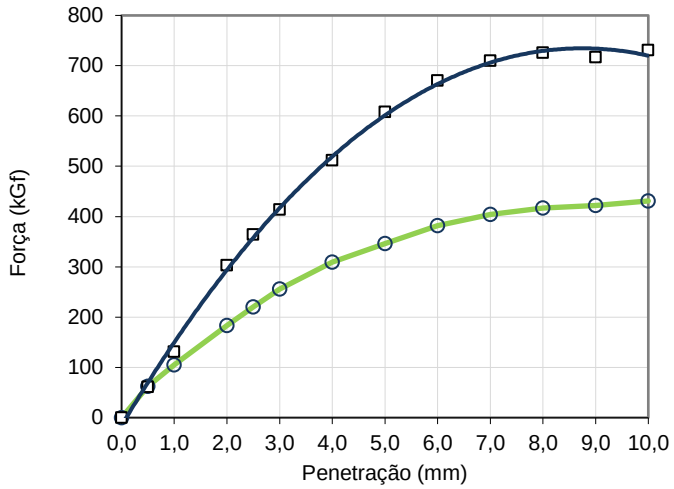


Fig. 34 – Curvas força-penetração do ensaio CBR dos provetes compactados com 25 pancadas

Neste caso o provete com bioenzimas tanto aos 2,5 mm de penetração como aos 5,0 mm, isto é, aos 50% e aos 100% teve uma pior performance que o provete de controlo.

Para o cálculo do valor de CBR para uma compactação relativa de 100% consideram-se os provetes elaborados com 55 pancadas. Na Fig. 35 temos representados os traçados das curvas tensão-deformação, já corrigidas, desses mesmos provetes. A origem destes valores está representada no A2. Leituras do Ensaio CBR para provetes compactados com 55 pancadas.

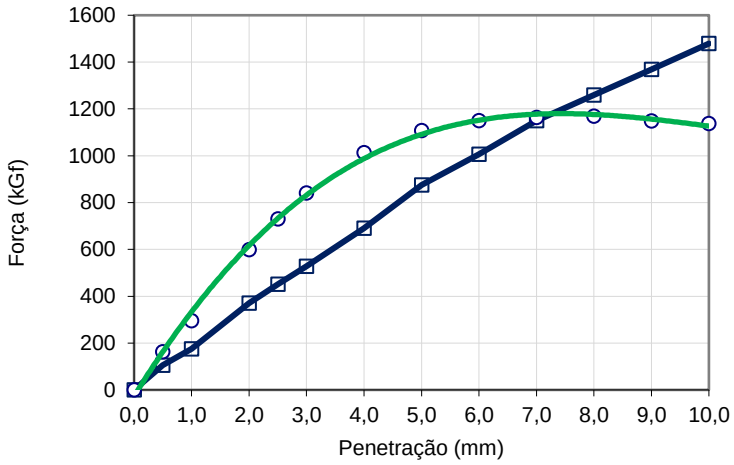


Fig. 35 – Curvas força-penetração do ensaio CBR dos provetes compactados com 55 pancadas

Neste caso, podemos concluir que o provete estabilizado tanto aos 95% como aos 100% necessitou de mais força para as respetivas penetrações, o que nos mostra que houve uma melhoria do solo a nível mecânico.

Na Tab. 17 encontram-se representados os valores do CBR para uma compactação relativa de 100%. Na primeira linha da tabela, é observável que o CBR relativo ao solo 3 sem aplicação das bioenzimas e, na segunda linha, com enzimas. Tendo em conta os valores, podemos concluir que houve uma melhoria no valor do CBR de 54,8% aquando da aplicação das bioenzimas.

Tab. 17 – Resultados do CBR para uma compactação relativa de 100%

CR	CBR	Expansão
100,0	42	0,1
100,0	65	0,1

6
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da influência das bioenzimas na estabilização de solos através de um procedimento experimental com um produto bioenzemático, de forma a concluir as melhorias passíveis de ocorrer nos solos.

Na primeira fase dos ensaios, e contrariamente ao expectável, o solo 1 e o solo 2 não apresentaram um grande incremento no que diz respeito à resistência à compressão e à diminuição da deformação. Através das curvas força-deformação, foi possível verificar que a adição da solução estabilizadora aos nossos solos pouco ou nada modificou a sua capacidade de carga, tendo até, por vezes, diminuído essa capacidade.

Numa segunda fase, onde se realizaram ensaios SEM ao solo 1 e 2, é possível verificar a ocorrência da precipitação de $CaCO_3$, observando-se que o precipitado se formou uniformemente ao longo da amostra, o que poderá resultar num aumento na resistência do solo, ou seja, na maior capacidade de suportar cargas, algo que não foi ao encontro dos resultados experimentais.

Relativamente ao solo 3, constatou-se que nos provetes compactados com 55 pancadas existiu um incremento de 54,8% do valor do CBR ao aplicarmos as bioenzimas no solo.

Adicionando aos resultados positivos do ensaio CBR e do ensaio SEM, tivemos a confirmação da presença de enzimas no nosso produto através do ensaio SDS-PAGE. Os resultados destes três ensaios corroboram a tese de que o ensaio Marshall não é um bom indicador de resistência à deformação.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos neste trabalho e com o objetivo de completar este estudo, seria do maior interesse:

- Estudar possíveis impactes ambientais do processo de bioestabilização e formas de diminuir estes impactes.
- Estudar a aplicabilidade deste método a uma maior escala, por exemplo em obra.
- Determinar a resistência à compressão dos provetes bioestabilizados, com base no ensaio UCS, e comparar os resultados com os resultados de ensaio com prensa Marshall.
- Realizar ensaios CBR ao fim de mais dias.
- Estudar a variação de $CaCO_3$ precipitado em provetes estabilizados.

- Realizar ensaios XRD para analisar a diferente composição química dos provetes com e sem bioenzimas e comparar os mesmos com os ensaios SEM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SSSA, 1997. Glossary of Soil Science Terms 1996. Soil Sci. Soc. Am. Madison.

[2] E. K. Tim and W. S. Dale, "Modern soil stabilization techniques," in *Characterization and Improvement of Soils and Materials Session*, p. 16, Transport Association of Canada, Ottawa, Canada, 2007.

[3] K. Onyelowe and O. Ubachukwu, "Stabilization of OLOKORO- UMUAHIA laretic soil using palm bunch ash as admixiture. UMUDIKE," *Journal of Engineering Technology*, vol. 1, pp. 67–77, 2015.

[4] HF Winterkorn, "Estabilização do solo e reboco", em Manual de Engenharia de Fundações, H.-Y. Fang, Ed., Van Nostrand Reinhold, Nova York, NY, EUA, 1991.

[5] AA Firoozi, C. Guney Olgun, AA Firoozi e MS Baghini, "Fundamentos da estabilização do solo",Revista Internacional de Geoengenharia, vol. 8, não. 1, 2017.

[6] C. C. Ikeagwuani and D. C. Nwonu, "Resilient modulus of lime-bamboo ash stabilized subgrade soil with different compactive energy," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 3557–3565, 2019.

[7] C. C. Ikeagwuani and D. C. Nwonu, "Emerging trends in expansive soil stabilisation: a review," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 423–440, 2019.

[8] M. R. Abdi, *Effects of Calcium Sulphate on Lime Stablized Kaolinite*, 'e Polytechnique of Wales, Pontypridd, U.K, 1992.

[9] S. He, "Chemical stabilization of expansive soils using liquid ionic soil stabilizers," University of Texas, Austin, TX, USA, 2019, Ph.D. dissertation.

[10] D. R. Holtz and D. W. Kovacs, Contribution of Organic Matter to Cation Exchange Capacity and Specific Surface Area of Fractionated Soil Materials, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1981.

[11] M.R. Asgari, A.B. Dezfuli, M. Bayat), Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. Arab J Geosci (2015) 8:1439–1452.

[12] I.I. Akinwumi, I. Ukegbu, Soil modification by addition of cactus mucilage, Geomech Eng (2015) 8(5):649– 661

[13] HENRRIN, M.; MITCHELL, H. Misturas de Solo-Cal. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação 426, 1968. Rio de Janeiro, Brasil.

[14] Yashuara, H, Neupane, D. Hayashi, K, Okamura, M. (2012) "Experiments and predictions of

physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation".

Soils Foundaition, 52 (3): 539-549

[15] Neupane, D.; A. Masce, Yashuara; H. Kinishita N.; Unno, T. (2013). "Applicability of

Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation as a soil-strengthening Technque". Journal of

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering; 139: 2201-2211

[16] Almajed, A., Lateef, M. A., Moghal, A. A. B. & Lemboyer, K. Geotechnical and geoenvironmental consultant. Crystals 11, 1–22 (2021).

[17] D. E. Scholen, "Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers," in *Proceedings of the Sixth International Conference Low-Volume Roads, II*, pp. 252–260, Minneapolis, MN, USA, June 1995.

[18] J. S. Tingle, J. K. Newman, S. L. Larson, C. A. Weiss, and J. F. Rushing, "Stabilization mechanisms of nontraditional additives," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1989-2, no. 1, pp. 59–67, 2007.

[19] M. Taha, T. Khan, I. Jawad, and A. Firoozi, "Recent experimental studies in soil stabilization with bio-enzymes-a review", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 18, pp. 3881–3894, 2013.

[20] L. Lindenbaum, "Soil stabilization system," United States Pat. Appl. Publ. US 2008/0298905 A1, 2008.

[21] O. Cuisinier and F. Masrouri, "Soil treatment with organic non-traditional additives for the reduction of environmental impact of earthworks," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, no. 4, pp. 703–708, 2013.

[22] T. A. Khan and M. R. Taha, "Effect of three bioenzymes on compaction, consistency limits, and strength characteristics of a sedimentary residual soil," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 798965, 9 pages, 2015.

[23] A. F. Rauch, L. E. Katz, and H. M. Liljestrand, An Analysis of the Mechanisms and Efficacy of three Liquid Chemical Soil Stabilizers: An Analysis of the Mechanisms and Efficacy of three Liquid Chemical Soil Stabilizers, Vol. 1, Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003.

[24] R. L. Santoni, J. S. Tingle, and S. L. Webster, "Stabilization of silty sand with nontraditional additives," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1787, no. 1, pp. 61–70, 2002.

[25] J. S. Tingle and R. L. Santoni, "Stabilization of clay soils with nontraditional additives," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1819, no. 1, pp. 72–84, 2003.

[26] C. Stan and V. Ciobanu, "Using enzymatic emulsions to reinforce road layers," *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, vol. 5, pp. 109–114, 2012.

[27] S. Q. John, E. F. Lockwood, R. L. 'omas, K. S. Denis, and P. James, "Water proof road bed construction: United States patent," US 8; 348; 547 B2, 2013.

[28] R. Velasquez, M. O. Marasteanu, and R. H. Clyne, "Preliminary laboratory investigation of enzymes," Technical report, University of Minnesota, Department of Civil Engineering 500 Pillsbury Drive, Minneapolis, MN, USA, 2005.

[29] Alencar, I. S., Ferreira, E. A. & Sevalho, E. D. S. Uso de enzimas para estabilização de solos. *Rev. InterScientia* **7**, 102–114 (2019).

[30] Venda Oliveira, P.J.; Freitas, L.D.; Carmona J.P.S.F (2016), "Effect of soil tpe on the enzymatic Calcium Carbonate precipitation process used for soil improvement". Journal of Materials in Civil Engineering, 29(4): 04016263.

[31] Venda Oliveira, P.J., Costa, M.S., Costa, J.N.P., Nobre, M.F. (2015). "Comparison of the ability of two bactéria to improve the behaviour of a sandy soil". Journal of Material in Civil Engineering, 27(1): 06014025. DOI: 10.1061/(ASCE) MT. 1943-5533.0001138.

[32] BROWN S F, K E COOPER and G R POOLEY. Mechanical properties of bituminous materials for pavement design, Proc Eurobitume Symp, Cannes, France, pp 143–147, 1981. Reprinted in a special publication of Asphalt Technology, Jan 1982. Institute of Asphalt Technology, Dorking

ANEXOS

A1. LEITURAS DO ENSAIO CBR PARA PROVETES COMPACTADOS COM 25 PANCADAS

	Provete sem enzimas	Provete com enzimas
Penetração (mm)	Força (kgf)	Força (kgf)
0,0	0	0
0,5	61	62
1,0	131	105
2,0	303	183
2,5	364	220
3,0	414	156
4,0	512	309
5,0	608	346
6,0	670	382
7,0	710	404
8,0	726	417
9,0	717	422
10,0	731	431

A2. LEITURAS DO ENSAIO CBR PARA PROVETES COMPACTADOS COM 55 PANCADAS

	Provete sem enzimas	Provete com enzimas
Penetração (mm)	Força (kgf)	Força (kgf)
0,0	0	0
0,5	105	163
1,0	175	296
2,0	370	599
2,5	451	730
3,0	528	841
4,0	690	1013
5,0	875	1108
6,0	1006	1150
7,0	1150	1163
8,0	1259	1169
9,0	1369	1148
10,0	1479	1138