

A UTILIZAÇÃO DE BIOESTABILIZADORES EM SOLOS – APLICAÇÃO A ELEMENTOS DE TERRA

JOSÉ PEDRO NASCIMENTO DA COSTA MELO

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

MARÇO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

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 - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

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 de sangue e de coração,

“Muchas gracias afición, esto es para vosotros”

Cristiano Ronaldo

AGRADECIMENTOS

Com o fim do meu percurso académico, gostaria de agradecer a várias pessoas que me acompanharam durante o meu trajeto e contribuíram para este momento.

Quero, em primeiro, agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro pelo apoio incondicional, todas as palavras de incentivo e orientação que tão importantes se revelaram para o culminar desta etapa. Com certeza levo um amigo para a vida.

Ao Professor Doutor Agostinho Benta pela ajuda dada e por se ter disponibilizado a acolher-me na empresa. Ao Rafael e à Edna que, apesar de algumas circunstâncias menos favoráveis, sempre ajudaram da melhor maneira possível para que tudo corresse pelo melhor.

Gostava de agradecer à família Espírito Santo por todo o apoio ao longo destes anos. Ao João por ser um amigo presente e pelo desempenho nas funções que lhe atribuí e ao André por toda a ajuda e bons momentos que passamos. A todos os amigos e pessoas que tive o prazer de conhecer ao longo desta jornada o meu obrigado.

À minha família, por ser especial à sua maneira e por ser a melhor do mundo.

Ao meu pai, pela presença, palavras e pela ajuda incansável na conciliação entre a minha vida académica e o meu negócio pessoal. À minha irmã, pela preocupação, ensinamentos e exemplos transmitidos. Ao meu avô Telmo, que certamente está comigo em todas as fases da minha vida. À minha avó Tenã, por ser a melhor pessoa do mundo e por me ter ensinado que a melhor coisa do mundo é de graça. À minha mãe, à pessoa que conheço que mais trabalha, por me ensinar os valores do esforço e honestidade e por ser um exemplo para mim. À Carolina pelo companheirismo, pela presença, por toda a ajuda e por ter passado e vivido todos estes momentos comigo.

Por último e num tom mais narcisista, quero agradecer-me a mim, por ter feito acontecer e fazer ver que no fim todos os sacrifícios valem a pena.

RESUMO

O uso da terra como prática construtiva é uma alternativa às técnicas tradicionais de construção, revelando vantagens que a tornam uma possibilidade promissora. Desta forma, o objetivo desta investigação é avaliar o impacto da bioestabilização aplicada a elementos de terra na construção.

Primeiramente, realizou-se a extração da enzima, de origem vegetal. Após a descrição detalhada do processo de obtenção, foi efetuada, complementarmente e de forma genérica, uma análise a diversos fatores externos, e de que forma os mesmos influenciam a velocidade das reações enzimáticas

Numa segunda parte, foram recolhidos dois solos distintos, ambos da região de Aveiro, para caracterização e avaliação através do ensaio Marshall e do ensaio de compressão não confinada (uniaxial) (UCS). Por meio dos ensaios, apurou-se a influência de diversas percentagens enzimáticas, bem como da presença ou não de um aditivo específico. De seguida, foram registados os diferentes valores das características mecânicas, nomeadamente a máxima força e deformação correspondentes. Face às diferentes condições dos ensaios e, de acordo com os melhores resultados, foi obtida a percentagem enzimática ótima.

Posteriormente, foi também feita uma breve comparação de custos, para a edificação de paredes com recurso a blocos de adobe estabilizados com a percentagem enzimática ótima, analisando as diferenças para um caso tradicional de utilização de blocos com adição de cimento.

Apesar de a estabilização de blocos de terra para posterior uso na construção revelar indicadores positivos ao nível da sustentabilidade, concluiu-se que ainda é um tema que carece de legislação e regulamentação mais completa no cenário português.

Os resultados obtidos levam a concluir que a aplicação de bioestabilizadores na construção com terra tem bons indícios. Contudo, é necessária uma atenta revisão no âmbito da regulamentação e um maior apoio às empresas para mais estudos e melhores resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Construção, Adobe; bioestabilização, solos, Marshall

ABSTRACT

The use of earth as a construction practice is an alternative to traditional construction techniques, revealing benefits that make it a promising solution. Therefore, the objective of this investigation is to evaluate the impact of biostabilization applied to earth elements in construction.

Firstly, it was performed the extraction of the enzyme, of vegetable origin. After a detailed description of the extraction process, an analysis of several external factors, and how they influence the speed of enzymatic reactions, was carried out.

In a second part, two different soils, both from the Aveiro region, were collected for characterization and evaluation through the Marshall test and the unconfined (uniaxial) compression test (UCS). Through the testing, it was investigated the influence of different enzyme percentages, as well as the presence or absence of a specific additive. Then, the different values of the mechanical characteristics, namely the corresponding maximum strength and deformation, were measured. Given the different test conditions and according to the best results, the optimum enzyme percentage was obtained.

Subsequently, a brief cost comparison was also made for the construction of walls using adobe blocks stabilized with the optimal enzymatic percentage, analyzing the differences to a traditional case of using blocks made with cement.

Although the stabilization of earth blocks for use in construction shows positive indicators in terms of sustainability, it was concluded that it is still a subject that lacks legislation and more complete regulation in the Portuguese scenario.

The results obtained lead to the conclusion that the application of biostabilizers in earth construction has good evidences. However, a careful review is needed in the scope of regulation and greater support to companies for more studies and better results.

KEYWORDS: Construction, Adobe; biostabilization, soils, Marshall.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA - MATSWAY	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. A TERRA - CONTEXTUALIZAÇÃO	3
2.2. LEGISLAÇÃO SOBRE CONSTRUÇÃO EM TERRA	5
2.2.1. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL	5
2.2.2. LEGISLAÇÃO NACIONAL	6
2.3. COMPOSIÇÃO DA TERRA	6
2.3.1. ARGILA	6
2.3.2. SILTES	7
2.3.3. AREIAS	7
2.4. PRINCIPAIS PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DA TERRA	7
2.5. TIPOS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA / TÉCNICAS CONSTRUTIVAS UTILIZADAS	8
2.5.1. TÉCNICAS CONSTRUTIVAS UTILIZADAS EM PORTUGAL	10
2.5.1.1. Taipa	11
2.5.1.2. Tabique	11
2.5.1.3. Adobe	11
2.5.1.4. Bloco de terra compactada	12
2.5.2. CONSTRUÇÃO EM ADOBE	12
2.5.2.1. Propriedades gerais das construções em adobe	12
2.5.2.2. Adobe no mundo	13
2.5.2.3. Adobe em Portugal	14
2.5.3. CONSTRUÇÃO EM ADOBE NO DISTRITO DE AVEIRO	16
2.6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA CONSTRUÇÃO COM TERRA	17

2.6.1. VANTAGENS.....	17
2.6.2. LIMITAÇÕES	19
2.6.3. VANTAGENS DO USO DE ADOBE EM RELAÇÃO A OUTROS SISTEMAS DE TERRA	19
2.7. SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA CONSTRUTIVO EM TERRA	20

3. ENZIMA ENZYMATS..... 23

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	23
3.2. FATORES QUE CONTRIBUEM PARA A VELOCIDADE DA REAÇÃO	24
3.2.1. TEMPERATURA.....	25
3.2.2. PH	25
3.2.3. CONCENTRAÇÃO DA ENZIMA	26
3.2.4. CONCENTRAÇÃO DO SUBSTRATO	27
3.3. CINÉTICA ENZIMÁTICA.....	28
3.3.1. ENZIMA ALOSTÉRICA E NÃO ALOSTÉRICA.....	28
3.3.2. EQUAÇÃO DE MICHAELIS-MANTEN	30
3.3.3. CONSTATANTE CATALÍTICA	30
3.3.4. EFICIÊNCIA CATALÍTICA.....	31
3.3.5. EQUAÇÃO DO DUPLO RECÍPROCO DE LINEWEAVER-BURK	31
3.4. EXTRAÇÃO DA ENZIMA UREASE A PARTIR DA SOJA	32
3.5. VALIDAÇÃO DA ENZYMATS	33
3.6. CRITÉRIOS ESPECÍFICOS PARA O USO DA BIOENZIMA	34

4. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E OBTENÇÃO DA PERCENTAGEM ENZIMÁTICA ÓTIMA..... 35

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	35
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS S1 E S2	36
4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE S1 E S2	36
4.2.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA	37
4.2.3. ENSAIO PROCTOR DO SOLO S1	38
4.2.4. EQUIVALENTE DE AREIA	38
4.2.5. CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA DE S1 E S2	39
4.3. DOSAGEM ÓTIMA ENZIMA + ADITIVOS.....	39
4.3.1. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S1	41

4.3.2. ENSAIO UCS PARA O SOLO S1	44
4.3.3. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S2	48

5. ANÁLISE DE CUSTOS	51
5.1. INTRODUÇÃO	51
5.2. ESPECIFICIDADES DO BLOCO	51
5.3. CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS	52
5.3.1. EQUIPAMENTO	52
5.3.2. MÃO-DE-OBRA	53
5.3.3. MATERIAL	53
5.3.4. APLICAÇÃO NA EDIFICAÇÃO DE PAREDES	54
5.3.5. COMPARAÇÃO COM BLOCO DE CIMENTO	55

6. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	57
6.1. CONCLUSÕES	57
6.2. PRINCIPAIS LIMITAÇÕES	58
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	58

Referências Bibliográficas	59
---	-----------

Anexos	A
A1. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S1	A
A.1.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	A
A.1.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	A
A.1.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS SEM ADITIVO	B
A.1.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS SEM ADITIVO	B
A.1.5. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 28 DIAS SEM ADITIVO	C
A.1.6. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 28 DIAS SEM ADITIVO	C
A.1.7. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO	D
A.1.8. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO	D
A.1.9. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS COM ADITIVO	E

A.1.10. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS COM ADITIVO	E
A.1.11. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 28 DIAS COM ADITIVO	F
A.1.12. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 28 DIAS COM ADITIVO	F
A2. ENSAIO UCS PARA O SOLO S1	H
A.2.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	H
A.2.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	H
A.2.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS SEM ADITIVO	I
A.2.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS SEM ADITIVO	I
A.2.5. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO.....	J
A.2.6. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO	J
A.2.7. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS COM ADITIVO.....	K
A.2.8. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS COM ADITIVO	K
A3. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S2	L
A.3.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	L
A.3.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO	L
A.3.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO.....	L
A.3.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO	M

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Hotel Salar, Bolívia.....	4
Fig. 2 – Pirâmide de Saqqara, Egito	5
Fig. 3 – Classificação da Terra com base na Composição.....	6
Fig. 4 – Diagrama dos principais métodos construtivos segundo o CRATerre	9
Fig. 5 – Técnicas tradicionais construtivas em Portugal	10
Fig. 6 – Tijolo de adobe	11
Fig. 7 – Objeto em madeira designado “socador” ou “sóca”	13
Fig. 8 – Mapa de Portugal Continental com a marcação da existência de arquitetura de adobe e carta das bacias hidrográficas.....	15
Fig. 9 – Ria de Aveiro.....	16
Fig. 10 – Exemplos de construções em adobe no distrito de Aveiro	17
Fig. 11 – Gasto energético associado a diferentes parâmetros: taipa, betão e tijolo.....	18
Fig. 12 – Condutividade térmica associada a diferentes parâmetros: taipa, betão e tijolo.....	19
Fig. 13 – Energia usada em materiais para alvenaria.....	21
Fig. 14 – Solução com Ca^{2+}	24
Fig. 15 – Solução sem Ca^{2+}	24
Fig. 16 – Ação da temperatura sobre a velocidade de uma reação catalisada por enzima	25
Fig. 17 – Efeito do pH na atividade da enzima	26
Fig. 18 – Efeito da concentração de enzima sobre a velocidade inicial da reação	26
Fig. 19 – Relação entre a concentração de substrato S e a velocidade inicial v_0 em reações enzimáticas.....	27
Fig. 20 – Esquema da reação de uma enzima alostérica.....	29
Fig. 21 – Esquema da reação de uma enzima não alostérica.....	29
Fig. 22 – Cálculo de v_{max} e K_M a partir do gráfico de Lineweaver-Burk	31
Fig. 23 – Moagem das partículas de soja com recurso a um pilão.....	32
Fig. 24 – Peneiração das partículas na malha 250 mm.....	32
Fig. 25 – Gravimétrica	32
Fig. 26 – Separação entre retidos e passados	32
Fig. 27 – Pesagem de 1g de passados.....	33
Fig. 28 – Adição de água destilada aos tubos de ensaio	33
Fig. 29 – Solução obtida após mistura.....	33
Fig. 30 – Centrifugadora.....	33
Fig. 31 – Amostra de solução com partículas em suspensão	34
Fig. 32 – Colheita de solo S1 na região de Aveiro.....	35
Fig. 33 – Curva granulométrica do solo S1	37
Fig. 34 – Curva granulométrica do solo S2.....	37
Fig. 35 – Curva do ensaio Proctor do solo S1	38
Fig. 36 – Procedimento para obtenção do Equivalente de Areia.....	39
Fig. 37 – Esquematização da obtenção da solução enzimática	40
Fig. 38 – Mecanismo de desmolde dos provetes com recurso a macaco hidráulico	41
Fig. 39 – Ensaio Marshall para o solo S1	44
Fig. 40 – Adição do teor ótimo de água	45
Fig. 41 – Molde usado para o ensaio UCS	45
Fig. 42 – Provetes finais após desmoldagem	45
Fig. 43 – Proвете fissurado após ensaio UCS	46

Fig. 44 – Ensaio UCS para o solo S1	47
Fig. 45 – Provete de adobe, balança e medidor	49
Fig. 46 – Ensaio na prensa Marshall	49
Fig. 47 – Ensaio Marshall para o solo S2	49
Fig. 48 – Bloco utilizado	51
Fig. 49 – Equipamento utilizado na produção dos blocos	52
Fig. 50 – Planta do caso a analisar	54
Fig. 51 – Bloco utilizando cimento	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 1 – Composição granulométrica ideal para a obtenção de adobe, segundo com vários autores	12
Tab. 2 – Requisitos granulométricos para o uso da bioenzima	34
Tab. 3 – Caracterização do Solo S1	36
Tab. 4 – Caracterização do Solo S2	36
Tab. 5 – Dosagens de enzima e aditivos utilizadas em S1 e S2	39
Tab. 6 – Percentagens finais da solução enzimática obtidas	41
Tab. 7 – Composição dos provetes com S1 submetidos ao ensaio Marshall	42
Tab. 8 – Composição dos provetes com S1 submetidos ao ensaio UCS	46
Tab. 9 – Composição dos provetes com S2 submetidos ao ensaio Marshall	48
Tab. 10 – Características dos equipamentos utilizados	53
Tab. 11 – Custo associado à mão-de-obra	53
Tab. 12 – Custo da produção unitária do bloco de Adobe.....	54
Tab. 13 – Quantidade total de blocos utilizados	55
Tab. 14 – Custo da produção unitária do bloco de cimento	56

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

2NH_4^+ – Carbonato

Ca^{2+} – Cálcio

CaCl_2 – Cloreto de Cálcio

CaCO_3 – Carbonato de Cálcio

CO_2 – Dióxido de Carbono

CO_3^{2-} – Amónio

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – Ureia

E – Enzima

k – Constante de Velocidade

K_{cat} – Construção de Catalítica

K_M – Constante de Michaelis-Menten

P – Produto

[S] – Concentração de Substrato

t – Tempo

v – Velocidade

v_{max} – Velocidade Máxima

η – Rendimento

a.C. – Antes de Cristo

BTC – Bloco de Terra Comprimida

CRATerre – Centro Internacional de Arquitetura de Terra

EICP – Enzyme-Induced Calcite Precipitation

ENDS – Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável

EA – Equivalente de Areia

EU – União Europeia

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LP – Limite de Plasticidade

MICP – Microbially-Induced Calcite Precipitation

RPM – Rotações por minuto

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SDS-PAGE – Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis

UCS – Ensaio de Compressão não Confinada

Fig. – Figura

mL – Mililitro

Tab. – Tabela

Ton – Toneladas

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O uso de terra como material construtivo é uma prática ancestral adotada desde os primórdios da humanidade. Ao longo dos anos e como resposta à necessidade humana de obter maior conforto e qualidade de vida, foram sendo desenvolvidas diversas técnicas construtivas, ainda praticadas nos dias de hoje. O aparecimento de novos materiais na edificação de estruturas, como aço e o betão, possibilitou o surgimento de edifícios dotados de maior qualidade, conforto e resistência. Este crescimento, juntamente com uma carência de conhecimentos de cariz estrutural, conduziu a que a construção em terra perdesse caminho, sendo gradualmente abandonada em detrimento dos novos materiais.

A preferência pela construção em terra tem sido revitalizada ao longo dos últimos anos devido, principalmente, a questões de sustentabilidade, quer económica, quer ambiental, pelo que as características desta matéria-prima, tais como o baixo consumo energético, baixo custo e baixos índices de poluição associados, fazem da terra uma mais-valia, numa união entre tradição e modernidade.

Foram, ao longo dos anos, desenvolvidas diversas técnicas, que ainda hoje são usadas, de que são exemplo a taiba, o tabique e o adobe, que posteriormente originou os blocos de terra comprimida (BTC). O uso de blocos em adobe permite uma maior adaptação em relação às condições técnicas e arquitetónicas de cada região e possibilita o uso dos blocos de terra não só como elementos estruturais, mas também como elementos de enchimento.

Na constante procura de metodologias que reduzam os impactos ambientais, têm sido desenvolvidos novos métodos de melhoramento das características dos solos no âmbito da biotecnologia. Tendo em consideração a aplicabilidade da biotecnologia na geotecnia, uma técnica que tem vindo a ser desenvolvida é a hidrólise da ureia para induzir a precipitação do carbonato de cálcio no solo e consequente cimentação do solo. Esta metodologia recorre ao uso de cloreto de cálcio, ureia e à enzima urease, proveniente de plantas ou microrganismos.

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação das características mecânicas de blocos de solo extraído da região de Aveiro. Recorreu-se, também, a um processo de estabilização do solo, dando vida à EnzyMats, onde a obtenção da enzima urease foi feita a partir de fonte agrícola, mais concretamente a soja. Sendo assim, foram realizadas comparações dos blocos em adobe com diferentes percentagens de constituintes e uma percentagem ótima de EnzyMats, o que permitiu avaliar, por meio de ensaios de compressão, a resistência e deformabilidade dos mesmos, visando verificar a sua aplicabilidade enquanto material de construção.

Deste modo, e no âmbito deste trabalho, foi realizado todo um processo experimental que permitiu avaliar a aplicabilidade de bioestabilizadores a elementos de terra e verificar o comportamento mecânico desses mesmos blocos na presença ou na ausência da EnzyMats, processo este que foi realizado na empresa MatsWay.

1.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA - MATSWAY

A MatsWay é uma empresa de investigação científica que visa a conceção e criação de novas soluções tecnológicas para infraestruturas rodoviárias. Está localizada na cidade de Ílhavo, integrada na região de Aveiro e tem sede no PCI – Creative Science Park. A empresa tem como objeto a conceção de novos produtos e materiais, que aliados aos processos de fabrico, permitam um aumento da eficiência do desempenho, aumento da segurança, diminuição do gasto energético e consequente redução do impacto ambiental. Abrange ainda prestações de serviços na vertente tecnológica, certificação de produtos e processos, formação técnica, bem como desenvolvimento de estudos e projetos, em cooperação com organismos e instituições universitárias.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O desenvolvimento da dissertação é dividido em 6 capítulos. O primeiro capítulo é de natureza introdutória, onde são descritos os principais objetivos do trabalho, definindo a metodologia seguida para atingir os resultados pretendidos e é também indicada informação relativa à empresa onde o estudo foi desenvolvido.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a construção em terra em Portugal e no mundo, abordando a sua origem, os principais métodos construtivos e alguns exemplos de edificações recorrendo a essas técnicas. É destacado com maior relevância o uso de adobe que origina os BTC, referindo as principais vantagens e limitações e, posteriormente, é realizada uma revisão bibliográfica relativa à sustentabilidade do sistema construtivo utilizando a terra.

O capítulo 3 diz respeito ao estudo detalhado da EnzyMats, enzima fabricada na empresa Matswasy. São abordadas temáticas gerais das enzimas, relevando fatores que contribuem para a velocidade da reação enzimática. É também apresentado o método de extração da EnzyMats, bem como a sua validação e critérios específicos para o uso.

No capítulo 4, efetua-se a caracterização e descrição de dois solos e, em simultâneo, procura-se a obtenção da percentagem de EnzyMats ótima a usar nesses mesmos solos por meio do ensaio de Marshall e do ensaio de compressão não confinada (UCS). Complementarmente, é feita a caracterização granulométrica, estudo dos limites de consistência, teor ótimo de água e equivalente de areia.

O capítulo 5 faz referência à análise económica realizada, onde é efetuada uma avaliação de custos da instalação de unidade de produção de blocos de adobe estabilizados com EnzyMats e a aplicação num caso concreto. Posteriormente é feita uma breve comparação de custos entre o uso de Adobe e cimento na obtenção dos blocos.

No capítulo 6, são detalhadas todas as considerações finais, sendo apresentadas as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo destina-se à revisão bibliográfica dos conteúdos estudados ao longo da dissertação. Partindo da contextualização da terra como material de construção, é feita uma análise da legislação aplicável e feito um estudo da composição e propriedades das mesmas. Posteriormente é realizada uma enumeração das técnicas construtivas, vantagens e desvantagens inerentes ao uso da terra como material construtivo e por fim abordada a temática da sustentabilidade deste sistema construtivo.

2.1. A TERRA - CONTEXTUALIZAÇÃO

A terra é um material milenar, assumindo-se como um dos primeiros a ser utilizado pelo Homem [1]. Esta matéria, quando usada como material de construção, é inúmeras vezes enunciada com designações distintas. Referido em termos científicos como barro, é uma mistura de argila, lodo (areia muito fina), areia e, ocasionalmente agregados de maiores dimensões como cascalho ou pedras [2]. Ao longo dos tempos, o Homem sempre esteve dependente da terra e de tudo o que a mesma envolvia e podia fornecer, direta ou indiretamente. Desde a era pré-histórica que existiu uma necessidade de sobrevivência por parte do Homem. Seja na procura de abrigos ou locais de refúgio, seja face a agentes climatéricos agressivos e ataques de animais selvagens. De acordo com o local e condições fornecidas pelo ambiente, esses locais de abrigo podiam assumir formas distintas. Devido à vasta experiência e conhecimento acumulados ao longo dos tempos sobre este material, foi possível conferir aos edifícios construídos com terra, boas respostas face a agentes climatéricos, conseguindo-se boas opções a nível económico e ambiental aliadas a uma maior longevidade destas edificações.

Construir com terra significa utilizar um material presente em toda a parte e que é um dos pilares da nossa vida. Visto que, não é apenas o chão que diariamente pisamos, mas serve também de base de sustento e é suporte fulcral para o desenvolvimento da maior parte dos elementos que constituem a nossa alimentação.

O uso de terra como material de construção pode ser empregue tendo por base duas formas principais: crua ou cozida. É essencial evidenciar, de forma simultânea, a diferença material e conceptual entre as mesmas. A primeira representa um material que é usado sem ser submetido a qualquer processo de transformação industrial. Por outro lado, o recurso a terra cozida subentende etapas de transformação industrial, mais especificamente a cozedura em fornos, a elevadas temperaturas [1].

Existem, inúmeros métodos, no que concerne à tradição de construir com terra crua, que aliados a uma infinidade de variáveis, caracterizam a identidade dos lugares e culturas em que se desenvolveram. É, assim, um material presente em todos os continentes, utilizado ao longo das épocas, desde a mais humilde habitação até ao mais grandioso edifício [1].

Não existe um consenso relativamente ao início do uso da terra para fins construtivos [3]. Existe, todavia, conhecimento do uso de técnicas de construção em terra há pelo menos 9000 anos. Há registo de casas que fazem recurso a tijolos de terra (adobe) que datam de 8000 a 6000 a.C situadas no Turquestão russo. Há também evidências de fundações de terra batida com data de 5000 a.C localizadas na Assíria [2]. Foi, deste modo, ao longo dos tempos, utilizada por várias civilizações, desde as do Antigo Egipto (perto ao rio Nilo), os Fenícios (na parte Ocidente do Mar Mediterrâneo) e também pelos povos da América Central e Latina. Na atualidade, é possível verificar registos de património histórico em terra, como é o caso da cidade milenar de Jerico situada na Cisjordânia, edificada em adobe (8.000 a.C) ou o exemplo da Grande Muralha da China, onde está presente o uso de taipa (3.000 a.C) [4].

Nos dias de hoje, o recurso ao elemento terra é feito amplamente em construções em regiões como África (mais concretamente na região Norte). Também na América Central e Latina bem como no continente asiático é feito uso em grande escala deste recurso, principalmente fora das grandes metrópoles [5]. Como exemplo, pode-se considerar o caso do Hotel Salar, situado na Bolívia (Fig. 1) que utiliza blocos de terra extraído da região para a edificação de paredes e mobiliário.



Fig.1 – Hotel Salar, Bolívia [2]

A tradição de edificação com este material, teve origem, principalmente, com a civilização Romana (responsável pelo primeiro “cimento leve”, constituído por cal e pozolana) e, posteriormente, pelos muçulmanos.

Existem, igualmente, outras culturas que retiraram partido desta matéria-prima, tais como a Maia e Inca, no continente americano, e a Hindu e Budista, no continente asiático, seja em habitações mais rudimentares até edificações megalómanas, como são exemplo as pirâmides de Saqqara (Fig. 2) e a Muralha da China construídas há mais de 5000 anos.



Fig. 2 - Pirâmide de Saqqara, Egito [2]

Segundo Miguel Rocha, *"Construir com a Terra" não se resume apenas à construção utilizando como matéria-prima a terra. É muito mais que isso. Não só reflete aquilo que é a premissa de qualquer projeto de tomar como referência e ponto de inspiração o próprio lugar, mas também vai mais longe e propõe uma forma de intervenção que tira partido dos residentes do bairro como mão-de-obra* [1].

2.2 LEGISLAÇÃO SOBRE CONSTRUÇÃO EM TERRA

2.2.1. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

No século XX, face à utilização na indústria da construção de novos e distintos materiais e técnicas construtivas, foi praticamente abandonada a utilização da construção em terra.

Atualmente, o uso de terra na construção tem vindo a aumentar, com uma estimativa de 15 a 17% da população mundial a recorrer a este recurso como material construtivo. Tal fenómeno resultou das crises, quer económica quer petrolífera, que ocorreram na década de 70, e que obrigaram a que os países industrializados adotassem uma postura mais ambientalista, apelando à renovação e utilização da terra, chegando a construção com terra a integrar as normas legislativas e nacionais de alguns países, como é o da França, Alemanha, Nova Zelândia e Estados Unidos da América [1]. Na Alemanha, surgem a partir de 1944, as primeiras regras de carácter técnico relativas à construção em terra (Eart Building Code). Todavia, face às consequências da guerra, só a partir de 1951 é que foi possível a aplicação das mesmas com carácter normativo, DIN 18951 [6]. Posteriormente, em 1997 e 1998, foi elaborado um conjunto de recomendações de natureza técnica para a construção em terra, onde vigorava um estudo respeitante ao estado da arte da construção em terra designada “Lhmbau Regeln”. Este conjunto normativo assumiu-se como um dos principais no que concerne à regulação da prática desta técnica [3]. A Nova Zelândia, assume-se como um dos países onde a regulamentação para a construção em terra é das mais completas e está dividida em três partes:

- NZS 4397:1998 – Engineering Design and Earth Buildings – Define critérios de desempenho no que respeita à durabilidade, resistência, capacidade de retração, isolamento térmico e resistência ao fogo;
- NZS 4298:1998 – Materials and Workmanship for Earth Buildings – Estabelece requisitos no que concerne a materiais e mão-de-obra;
- NZS 4299:1998 – Earth Buildings not Requiring Specific Design – Empregues para edificações com uma área inferior a 600m² e define soluções construtivas para paredes e fundações [3].

2.2.2. LEGISLAÇÃO NACIONAL

No que diz respeito a Portugal, não há dados relativamente à regulamentação sobre a construção em terra. A edificação de obras efetuadas com técnicas de construção em terra crua é realizada sem ser necessário recorrer a códigos normativos. Por outro lado, as obras não são ratificadas pelas entidades competentes, uma vez que não existe um regulamento nacional que permita uma correta avaliação [7].

2.3 COMPOSIÇÃO DA TERRA

As técnicas construtivas que fazem recurso a terra, têm nesta a principal responsável pela resistência, sendo a resistência mecânica do solo em causa um fator essencial a considerar.

As características da terra diferem consoante a sua composição, sendo que esta varia de acordo a região de onde é obtida e de acordo com a profundidade. Esta matéria-prima é constituída essencialmente por areia (sílica), argila e silte, todas proveniências minerais. Outros componentes, em percentagens residuais, são os metais e sais solúveis (sulfatos, nitratos e cloretos) [5].

Observa-se na figura as diferentes classificações da terra de acordo com alterações proporcionais dos seus três constituintes mais relevantes.

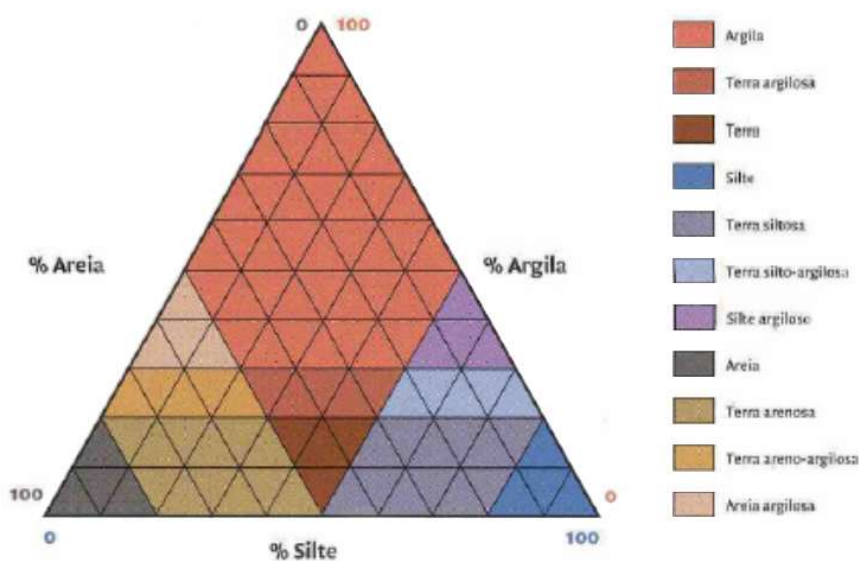


Fig. 3 – Classificação da Terra com base na Composição [5]

2.3.1. ARGILA

A argila é o elemento que constitui a parte mais fina dos solos, tendo grãos inferiores a 0,002 mm, é um constituinte fortemente instável. É responsável pela coesão do solo e consequentemente pela resistência à ação da água sendo que expande substancialmente quando a humidade sofre um aumento e contrai ao secar [1]. Com a finalidade de ser utilizada em construção, a terra tem de possuir um mínimo de 5% de argila, sendo que a sua capacidade de coesão é tão elevada, que, por norma, não é necessário mais de 20%. A presença de argila em quantidades excessivas origina o surgimento de fendas por efeito de retração aquando da secagem, sendo que é essencial conhecer a combinação mais

favorável dos restantes elementos para se conseguir a mistura de solo mais vantajosa para a construção [5].

2.3.2. SILTES

Os siltes são constituídos por grãos cujo tamanho está compreendido entre 0,002 e 0,06 mm, possuindo boa coesão quando húmido face à grande capacidade de reter água [4].

“Com efeito, a terra para construção deve apresentar o justo grau de gordura pois se é muito gorda (muito argilosa) ao secar contrai muito, arriscando-se a fender, originando a chamada fissuração de retração, que coincide com o desenho geométrico das poças quando secas. Por outro lado, se a terra é arenosa, se tem pouca argila, é demasiado magra e não sendo suficientemente plástica não tem força para permanecer junta, já que é a argila que estabelece a coesão.” [8]

2.3.3. AREIAS

As areias são constituídas por grãos minerais que as tornam partículas inertes quimicamente muito estáveis cuja dimensão está compreendida entre 0,06 e 2 mm. São, deste modo, um componente que confere resistência e diminui a fendilhação por retração [4]. Por outro lado, quando húmidas ligeiramente têm uma coesão aparente, resultante da tensão superficial da água que preenche os vazios entre os grãos [1].

2.4. PRINCIPAIS PROPRIEDADES E CARATERÍSTICAS DA TERRA

O material terra, possui diversas características, tanto de natureza física como química que o tornam como uma opção viável para o uso na construção.

As propriedades gerais de natureza física são:

- Cor da terra;
- Resistência em seco;
- Contração volumétrica;
- Estabilidade estrutural;
- Adesividade;
- Densidade aparente e volume específico;
- Porosidade;
- Permeabilidade;
- Humidade;
- Difusão capilar.

No que concerne às propriedades gerais de natureza química identifica-se:

- Componentes químicos presentes na terra;
- Influência da mineralogia;

- Influência de óxidos e sulfatos.

Por seu lado, as propriedades específicas relacionam-se, de maneira direta com as suas propriedades granulométricas e plásticas e de compressibilidade e coesão.

A granulometria está relacionada com a natureza, dimensão e quantidade dos inertes.

No que concerne à plasticidade, esta diz respeito à capacidade de aptidão da terra em ser modelada. Entende-se como compressibilidade a possibilidade que a terra assume em densificar e reduzir a porosidade. A coesão relaciona a intensidade da ligação dos inertes entre si com a capacidade de união das partículas quando sob o material é exercido um esforço de tensão.

A granulometria, assume, de entre as quatro propriedades mencionadas, uma maior relevância, dado que a variação percentual dos seus componentes permite uma escolha mais eficiente da técnica construtiva a adotar de acordo com a situação [1].

2.5. TIPOS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA / TÉCNICAS CONSTRUTIVAS UTILIZADAS

Entende-se por técnicas construtivas em terra qualquer técnica que seja empregue na edificação de infraestruturas, onde se usa a terra como matéria-prima sem se recorrer à sua cozedura [9]. Deste modo, para se assumir uma técnica construtiva com recurso a terra crua, a matéria-prima não pode ser sujeita a alterações no que concerne às suas características mineralógicas.

Em 1986, foi criado pelo grupo CRATerre um diagrama com a finalidade de identificar os principais métodos de uso da terra para a construção, o qual pode ser observado na figura 4. O CRATerre, Centro Internacional de Arquitetura de Terra, foi fundado em 1979 em Grenoble e assume-se como entidade pioneira no que concerne à temática da construção em terra [5]. Com mais de 30 anos de envolvimento no setor, esta entidade procura fornecer uma resposta válida às questões associadas à proteção do ambiente, à preservação da diversidade cultural e ao combate contra a pobreza. Deste modo, os três objetivos principais do CRATerre focam-se na:

- Otimização da utilização dos recursos locais, humanos e naturais;
- Melhoramento da habitação e condições de vida;
- Valorização e promoção da diversidade cultural [10].

É possível, então, enunciar 18 técnicas de construção (Fig.4), as quais podem ser subdivididas em três sistemas sendo eles:

- A - Monolítica (in situ);
- B - Por unidades (alvenaria);
- C - Por enchimento e revestimento [11].

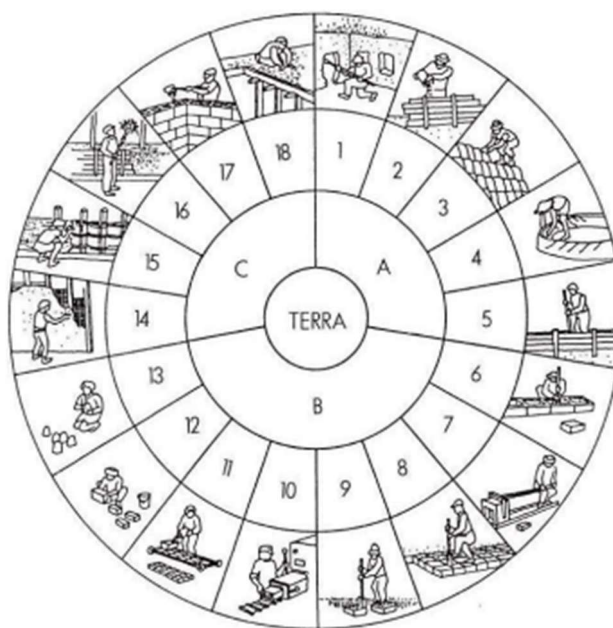


Fig. 4 – Diagrama dos principais métodos construtivos segundo o CRATerre [5]

O grupo A é constituído por 5 técnicas construtivas usadas de forma monolítica, não sendo necessária a separação do material em unidades menores. A construção funciona, desta forma como um todo unitário, não sendo feito recurso a qualquer outra estrutura. Estas técnicas possibilitam uma extração e transformação do material no próprio local da obra, evitando, deste modo, custos associados a transportes.

- Terra escavada: é a mais antiga técnica construtiva, sendo usada desde a Pré-História. Este método consiste em escavar o solo, em zonas que este apresente boas características mecânicas, na horizontal ou na vertical, originando grutas. Há exemplos nos países europeus do Mediterrâneo para as escavações horizontais, em regiões da Tunísia e Ásia para as escavações verticais.
- Terra modelada: A terra é usada no estado plástico de modo a erguer paredes pouco espessas por sobreposição de camadas, sendo moldadas diretamente à mão. É uma técnica que dá origem, normalmente, a edifícios de formas redondas e a sua utilização é muito comum, particularmente em países africanos e próximos do Equador.
- Terra empilhada: Este método consiste em empilhar bolas de terra, com o objetivo de formarem muros espessos, em camadas sucessivas originando paredes. Posteriormente a parede é aparada ou regularizada, obtendo-se, com efeito, uma superfície menos rugosa. Esta técnica está patente em habitações rurais simples no Afeganistão e em certos países do Médio Oriente como o caso do Iémen do Sul e Arábia Saudita. Foi também usada na Europa, mais concretamente em França e Inglaterra.
- Terra vazada: Esta técnica foi utilizada durante a II Guerra Mundial tendo em conta a escassez de materiais de construção na época. Consiste na mistura terra argilosa com areias grossa e gravilhas, dando origem a uma massa, à qual se adiciona uma quantidade determinada de água para que assuma um estado plástico e posteriormente é vazada em cofragens, como se fosse

betão, possibilitando a construção de paredes monolíticas. Este sistema, devido às características que lhe são inerentes possui alguns inconvenientes nomeadamente de retração excessiva consequência do elevado teor em água que origina fissurações. É uma técnica pouco conhecida em Portugal, mas que possui alguns documentos normativos na Austrália [12] e Nova Zelândia.

- Terra prensada: Também designada de taipa, é a técnica com maior impacto a um nível global. Conseguida através da execução de terra crua de grandes dimensões é, posteriormente, compactada entre dois painéis laterais, e em fiadas seguidas, possibilitando a edificação de alvenarias resistentes de elevada espessura [13].

2.5.1. TÉCNICAS CONSTRUTIVAS UTILIZADAS EM PORTUGAL

Em Portugal, a utilização de terra crua na construção está presente, maioritariamente, em regiões do Sul. No entanto, nos dias de hoje, é uma técnica construtiva praticamente extinta [1]. Em Portugal a arquitetura em terra está fortemente conectada à vida das populações antigas, à maneira de utilizar os recursos naturais e à própria integração paisagística [14]. Assume-se, assim, como um legado patrimonial valioso, evidenciando valores fixos de sustentabilidade atuais, o que agrega um valor bastante significativo em termos de potencial informação [1]. Destacam-se, as regiões do sul e centro litoral, como aquelas em que a construção em terra é mais predominante. Por outro lado, nas regiões centro interior e norte, o uso da alvenaria de pedra é dominante.

É possível observar uma variedade de técnicas de construção, resultantes da existência de diferentes materiais característicos de cada região. Identificam-se, deste modo, três métodos construtivos em Portugal: taipa, tabique e adobe (Fig. 5)

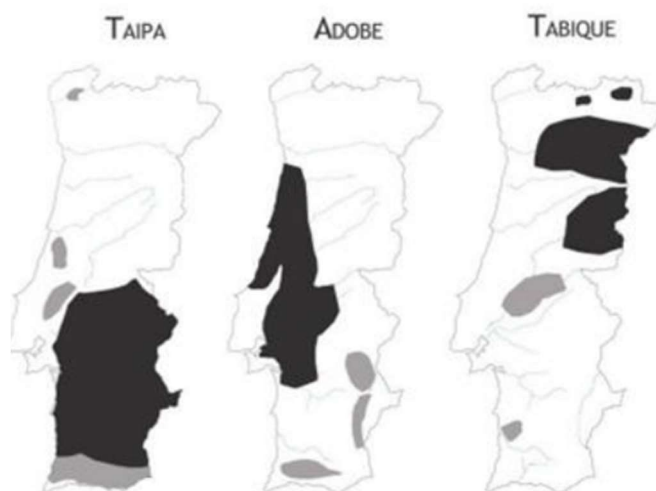


Fig. 5 - Técnicas tradicionais construtivas em Portugal [15]

2.5.1.1. TAIPA

A taipa assume-se como sendo uma técnica construtiva monolítica, que consiste em compactar um solo, de consistência terra húmida, em camadas, recorrendo a ferramentas como maço ou pilão. Por via deste método, é possível obter paredes com uma capacidade resistente e inércia térmica satisfatórias. O recurso a esta técnica era realizado mais na zona centro e sul do país (Ribatejo, Alentejo e Algarve). As paredes em taipa, aquando da carência da terra, de propriedades desejadas para a estabilidade, apresentam, diversas vezes, incorporação de outros materiais como reforço. Diz o ditado que *“a terra deve ser transportada por um coxo e batida por um louco”* [15].

2.5.1.2. TABIQUE

Recorre-se à utilização do tabique para paredes divisórias não resistentes de terra. Esta técnica é aplicada sobre, ou no interior de um suporte de madeira executado previamente (enxaimel) [15].

Diferencia-se, deste modo, do adobe e da taipa, visto que utiliza uma estrutura de madeira, maciça ou reticulada, que, por sua vez, é preenchida e revestida por um material terroso.

A região norte de Portugal, assume-se deveras rica em património edificado de tabique bem como a região do Alto Douro e de Trás-os-Montes [16].

2.5.1.3. ADOBE

A técnica de construção adobe, tem, como características, a simplicidade de fabrico e edificação, características estas que talvez resultem numa maior utilização da mesma. Muitas das construções históricas em adobe ainda hoje se encontram habitadas, sendo esta uma das técnicas mais antigas, mas sempre patente na humanidade. O termo adobe derivada do árabe “attob” e significa tijolo seco ao sol [3]. A construção com adobe, tijolos de terra crua, assume-se como uma das técnicas com maior uso em todo o mundo. Esta técnica, utiliza tijolos de terra (Fig.6), que são obtidos essencialmente por meio de argila, areia e palha [17]. É um composto obtido com terra no estado plástico, que é moldado sem necessidade de compressão, recorrendo a moldes, e, depois de seco, é utilizado na execução de alvenarias [18]. É um método que possibilita a construção de diversos elementos, de diversas formas, tais como paredes, arcos, janelas, cúpulas e abóbodas. Deste modo, possibilita a edificação de paredes autoportantes ou então pode ser implementada em técnicas mistas. É uma solução deveras interessante, devido a propriedades e qualidades que lhe são inerentes, como o conforto térmico, acústico, a regulação da humidade e sustentabilidade do ponto de vista ecológico [17].



Fig. 6 -Tijolo de Adobe [17]

2.5.1.4. BLOCO DE TERRA COMPACTADA

O BTC é um método construtivo que deriva do adobe, tendo resultado de uma evolução do mesmo por estabilização mecânica do solo. Resulta da prensagem do solo confinado num molde, dando origem a pequenos blocos de terra prensada [19]. A principal distinção entre os dois métodos prende-se na resistência, porque o adobe tem a sua resistência máxima depois de sujeito a um processo de cura, enquanto o BTC atinge o valor máximo de resistência devido à compactação da prensa. A compactação da prensa permite o melhoramento do material em termos qualitativos, aumentando a densidade e consequente resistência à compressão. Quando o solo não apresenta características ideais para a obtenção de BTC, recorre-se a processo de estabilização para alteração das propriedades melhorando o comportamento mecânico e físico do mesmo. A estabilização do solo pode ser feita de forma mecânica com a adição de fibras, física através da mistura de partículas de diferente granulometria, ou química por meio da adição de produtos químicos.

2.5.2. CONSTRUÇÃO EM ADOBE

2.5.2.1. PROPRIEDADES GERAIS DAS CONSTRUÇÕES EM ADOBE

A escolha eficaz da matéria-prima é o aspeto essencial para garantir que a aplicação da terra para a construção é realizada de forma bem-sucedida. A prioridade da terra a ser escolhida recai, sobretudo, em dois fatores: o modo como reage na presença de água e a sua resistência a nível mecânico [15].

Esta técnica construtiva, necessita da utilização de um solo com propriedades plásticas e argilosas, sendo essencialmente usado em regiões onde existe a presença de água [3]. Para o solo escolhido recomenda-se, igualmente, que tenha pouco silte. Caso a terra escolhida possua uma percentagem elevada de argila, existe um risco maior do surgimento de fissuras no adobe aquando do processo de secagem. Por outro lado, caso o teor de areia ou silte seja elevado, irá conduzir a um défice de coesão interna ótima e deste modo, desagregação com facilidade e consequente diminuição da resistência à compressão [18]. Não existe um consenso no que diz respeito às proporções indicadas de cada componente da terra sendo que vários autores balizam esses mesmos limites unicamente para a quantificação da argília. Os dados relativos à percentagem de cada elemento constituinte de adobe têm por base estudos de casos de vários países que possuem diferentes tipos de terra, estando as recomendações enunciadas na tabela 1 [18].

Tab. 1 – Composição granulométrica ideal para a obtenção de adobe, de acordo com vários autores

Autores	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Barrios et al. (1987)	35-45		55-65
Houben e Guillaud (1994)	5-29	-	-
Graham McHenry (1996)	15-25	-	-
Carazas Aedo (2002)	1 volume de terra argilosa: 2 volumes de terra arenosa		
HB 195 (2002)	10-40	10-20	30-75 (areia e pedregulho)
Proyecto Hornero (2007)	50% de terra argilosa: 50% de terra arenosa		

Considera-se o adobe como sendo um bloco com uma forma regular de argamassa com recurso a terra do local, sendo amassada com areia e fibras, posteriormente sendo moldado para obter o aspeto de bloco e passando por um processo de secagem ao sol. Para a construção de alvenarias de adobe, eram seguidos os mesmos princípios dos tijolos maciços. Para a modelação dos blocos era necessário um operário com um “adobeiro” (forma em madeira, munida com duas pegas nas laterais e revestida no interior com uma chapa de latão ou zinco para auxiliar na retirada do adobe do molde). Para a etapa de secagem, colocava-se o “adobeiro”, numa superfície nivelada previamente e posteriormente enchia-se o molde em madeira com argamassa preparada. Para a realização deste enchimento, recorria-se a uma enxada e, no que concerne à compactação utilizava um objeto em madeira, com o nome de “socador” ou “sóca” visível na Fig.7 [15].

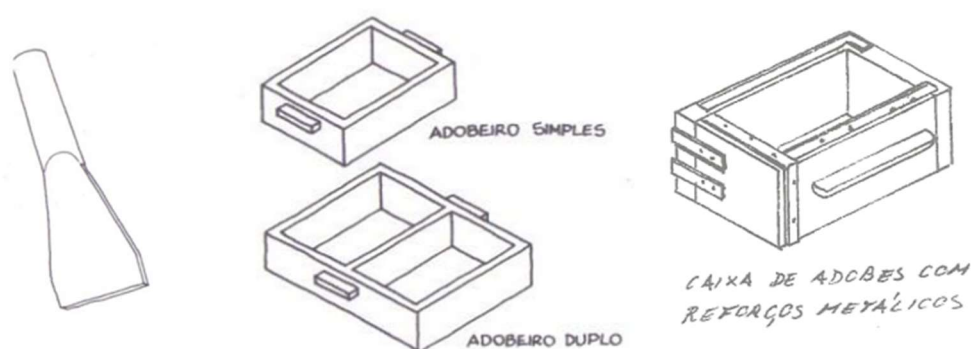


Fig. 7 – Objeto em madeira designado “socador” ou “sóca” [3]

Existem várias formas e tamanhos no que concerne aos blocos de Adobe [3] dependendo do local onde é extraída a terra.

Geralmente, os blocos de adobe, quando se trata de construções habitacionais, têm como dimensões $0.45 \times 0.30 \times 0.15 \text{ m}^3$. No que diz respeito aos blocos usados para muros e poços, as medidas mais convencionais seriam $0.45 \times 0.20 \times 0.15 \text{ m}^3$. [15].

Nas construções de habitações, as paredes exteriores possuem perto de 45 cm de espessura, podendo dar origem a paredes mais espessas.

2.5.2.2. ADOBE NO MUNDO

A presença do adobe, é, indubitavelmente, visível a nível mundial e tem vindo a ser enunciada em diversos mapas e projetos. O domínio deste material e técnica, revela-se, fulcral, no que diz respeito à continuidade desta técnica milenar. Contribui, com efeito, para a resolução e edificação de construções que se assumem eficazes e vantajosas economicamente em situações extremas como é o caso de desastres naturais. São exemplo, os campos de refugiados no Sudão e as casas no Haiti, após o terramoto de 2010, que são estruturas contruídas em adobe.

No continente africano, o uso de adobe está patente, na maioria dos países, havendo apenas uma ligeira carência no centro sul do continente.

No que concerne aos países árabes, nota-se, também uma grande presença do adobe, enfatizando a região marroquina onde as alvenarias são, simultaneamente, construtivas e decorativas.

Em terceiro lugar, na área do Pacífico Asiático, existe uma partilha desta técnica com as técnicas mistas bem como com as técnicas monolíticas.

Na América do Norte, o adobe está, indubitavelmente, presente, mais concretamente nos Estados Unidos da América, visível no património arquitetónico já existente, mas também na arquitetura contemporânea. Nota-se, também, a presença desta técnica em estados como o Novo México, Colorado, Texas e Arizona, mas em menor escala.

O continente europeu, é aquele onde estão presentes diversos métodos e materiais em terra. Com efeito, os países onde é mais incidente o uso de adobe são os países mais a sul como é o caso de Portugal, Espanha, Itália e França. Destaca-se, o caso italiano, especificamente a ilha da Sardenha, onde o recurso a esta técnica está muito presente.

De referir igualmente, como última região a zona da América Latina e Caraíbas. Existem, nesta zona, diversas variantes das técnicas mistas, várias delas incorporando adobes de pequenas dimensões no seu interior [20].

2.5.2.3. ADOBE EM PORTUGAL

O elemento, terra, assume-se como um recurso que pode ser empregue na construção, desde que estejam presentes as características essenciais e propriedades fulcrais que o possibilitem: escavação, empilhamento, modelação, prensa, compressão, corte e revestimento. A matéria-prima utilizada na construção com recurso a esta técnica, está, em Portugal, presente quer em ambientes urbanos como rurais [20].

Em Portugal, a metodologia que envolve o adobe é um processo muito antigo. Este método construtivo está presente em construções das mais diversas dimensões, que nos dias atuais assumem um grande valor histórico e cultural [14]. São conhecidos dois tipos de adobe, sendo eles um que requer apenas o uso de terra (adobe com terra) e outro que requer o uso de cal e areia. No que concerne ao primeiro, o mesmo é utilizado em regiões que possuam solos profundos com elevada percentagem de argila. O adobe que incorpora cal e areia é obtido com uma relação de 4 partes de solo argiloso e areia e 1 parte de cal, sendo usado em regiões que possuem zonas estuarinas, que conferiam uma propriedade arenosa aos solos [15].

Para a extração da terra própria para a construção, não existe necessidade de grande profundidade de escavação, havendo casos em que a terra presente na superfície cumpre os requisitos para ser empregue na construção. No caso português, a terra necessária para a construção está presente no subsolo, maioritariamente a poucos centímetros da superfície.

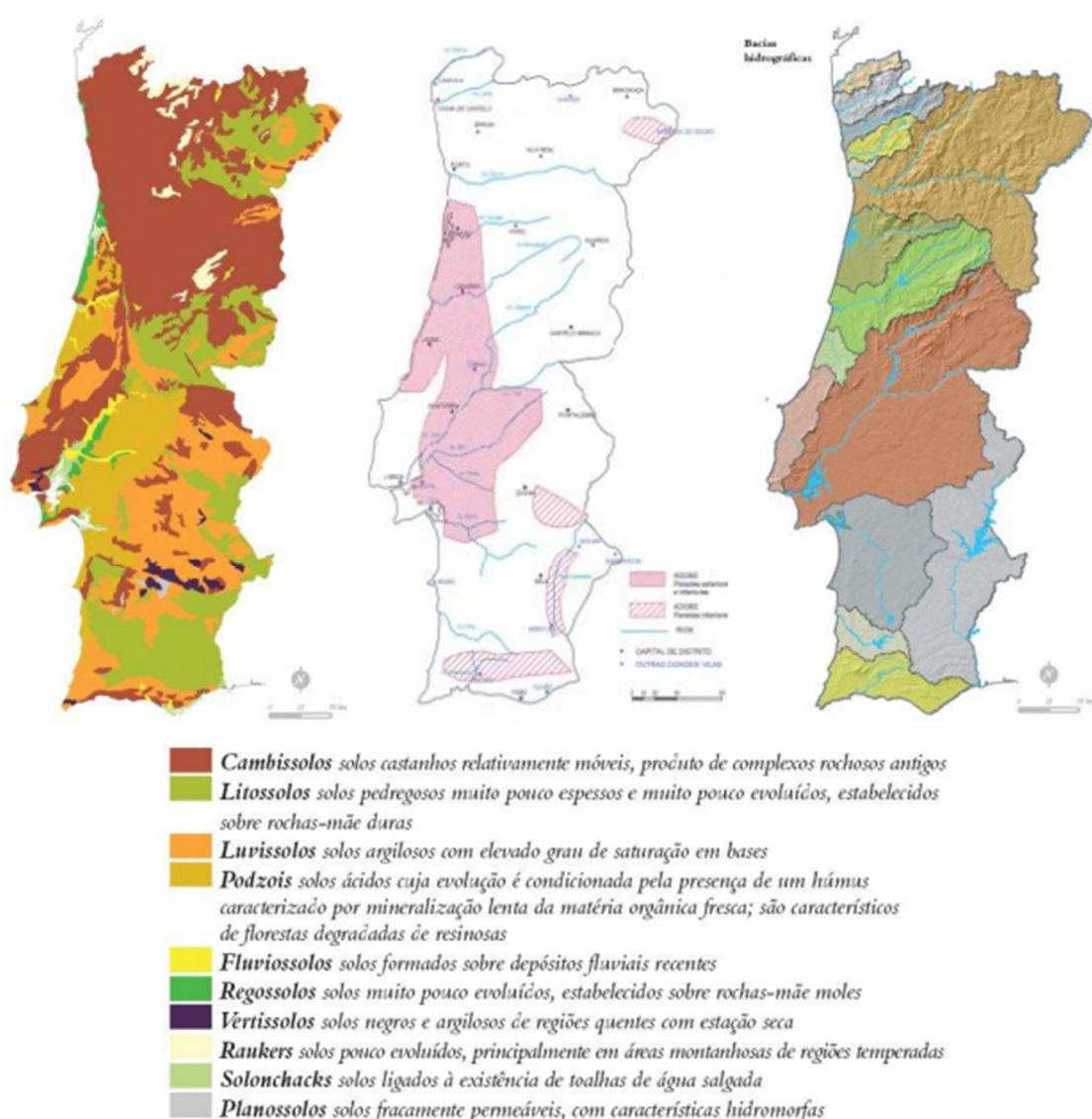


Fig. 8 - Mapa de Portugal Continental com a marcação da existência de arquitetura de adobe e carta das bacias hidrográficas [20]

Após a análise detalhada do mapa da Fig. 8, conclui-se que a presença de adobe é bastante acentuada na região da bacia hidrográfica do rio Tejo, deixando de estar presente aquando da dominância paisagística por parte dos Litossolos. É de realçar as regiões das bacias hidrográficas do Vouga e de Mondego, onde existe maior presença de construções em adobe. Esta técnica desaparece quando existe a presença de Cambissolos. Assim, é possível constatar que o surgimento do adobe está mais relacionado com a presença de água em elevada quantidade, em detrimento das características do solo. A informação obtida revela-se mais exata em superfícies onde os afloramentos rochosos são constantes, sendo a construção em adobe inviável. A ausência de terra, permite apenas fins agrícolas e as construções em alvenaria de pedra são as mais comuns. Deste modo, as construções em adobe surgem, maioritariamente, em zonas de Regossolos e são comuns na zona costeira perto das margens dos rios. Encontram-se, também, nas regiões de depósitos fluviais (Fluviosolos), nas zonas com

presença de solos ácidos e de mineralização lenta (Podzossolos) como é o caso das bacias hidrográficas do Tejo e do Mondego; e nas de Luviossolos (solos argilosos). “As características das terras são de tal modo distintas que, para análise da matéria-prima e para um conhecimento exato ou aproximado das terras em questão, são necessários ensaios de terreno e de laboratório” [20].

Na localidade de Tomar, as edificações em adobe concentram-se maioritariamente em zonas rurais, sendo também possível verificar a presença, ainda que em menor abundância, nas zonas urbanas. A nível topológico, são homogêneas, sendo de apenas um piso (rés-do-chão) na maior parte dos casos. A construção da cozinha era realizada nas traseiras, por razões de segurança contra possíveis fogos, e, por se tratar de zonas rurais, estar presente a criação de gado e atividades agrícolas.

Eram empregues blocos de adobes de seção retangular, sendo o comprimento, igual ou superior, ao dobro da altura. As medidas dos blocos usados, eram maioritariamente as de 15 x 20 x 46 cm e 13 x 23 x 46 cm para fins habitacionais [15].

2.5.3. CONSTRUÇÃO EM ADOBE NO DISTRITO DE AVEIRO

Como referido anteriormente, a presente dissertação foi realizada, na cidade de Aveiro, mais concretamente em Ílhavo. A cidade de Aveiro, localizada na região centro de Portugal, é capital de distrito. Conta com um município de 197.58 km² de área e 80 978 habitantes [21], estando dividido em 11 freguesias [22]. A nível de geográfico encontra-se limitada a norte, quer pela Ria de Aveiro (Fig.9) quer por terra, pelo município da Murtosa, a este por Águeda. A sul, faz fronteira com Oliveira do Bairro e, por fim a oeste com a freguesia de São Jacinto. Localiza-se a 63 km de Coimbra, a 70 km da cidade do Porto e a 255 km de Lisboa. A cidade de Aveiro, assume-se como um pilar fulcral a nível social, a nível de infraestruturas portuárias e ferroviárias e ainda na vertente universitária e turística.



Fig. 9 – Ria de Aveiro [21]

No caso de Portugal, a construção em alvenaria resistente em adobe está presente, com maior implantação, na zona de Aveiro. Tendo impulso na parte final do séc. XIX, teve o seu ponto alto durante a parte inicial do séc. XX, tendo caído em desuso nos anos sessenta confluindo para a sua total extinção como técnica construtiva [23]. De acordo com fontes do município, na atualidade, perto de 25% das construções presentes em Aveiro são de adobe. Caso se analise todo o distrito, o valor passa para 40%, sendo este sistema construtivo, indubitavelmente, fundamental para o meio rural [24]. Na

atualidade existem inúmeros exemplos de património histórico, na sua maioria relacionados com a Arte Nova, como é visível na Fig. 10. [25].



Fig. 10 – Exemplos de construções em adobe no distrito de Aveiro [25]

2.6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA CONSTRUÇÃO COM TERRA

À prática da construção utilizando terra, estão associadas vantagens e desvantagens inerentes a questões económicas, à capacidade de isolamento, quer térmico quer acústico, ao impacto ambiental e, principalmente à sua acessibilidade [26].

Assim sendo, tem havido um interesse crescente na utilização da construção em terra devido a múltiplos aspetos.

2.6.1. VANTAGENS

- Matéria-base de veras abundante, por norma presente no local (material extraído das fundações ou de diferentes escavações) que resulta numa poupança a nível de transportes;
- Propriedades adaptáveis consoante o uso, recorrendo a adições de areias, palha e ligante tais como argila e cal;

- Permite métodos de construção vantajosos do ponto de vista económico, tanto no que concerne à obtenção da matéria-prima, como no que diz respeito ao seu transporte e mão-de-obra, sendo que esta última não necessita de ser qualificada, mas apenas especializada (deste modo, o custo assume-se como o custo de mão-de-obra);
- É indicado para a autoconstrução devido a tratar-se de um material seguro e trabalhável manualmente sem apresentar grande grau de dificuldade na sua trabalhabilidade;
- É uma matéria-prima, que por se tratar de ter origem natural na sua totalidade se assume como bastante ecológica;
- Tem um consumo de água 60 vezes inferior, em comparação com a água necessária para a obtenção de betão;
- Eficiente a nível energético, por possuir baixos níveis de energia tanto na sua produção como utilização, sendo que nos métodos de construção mais tradicionais apenas era feito uso da energia solar em quantidades residuais (Fig. 11);
- 100% reciclável na medida em que é possível a reutilização do material resultante da demolição, sem existir desperdício de matéria-prima, apenas com a adição de água;
- Biodegradável, pois permite a sua nova utilização como terra, não tendo qualquer impacto na vegetação nem dando origem a entulho;
- É incombustível;
- Tem capacidade de proteger a madeira e outras matérias orgânicas não permitindo o seu apodrecimento;
- Tem características que possibilitam um grande conforto a nível de térmica, acústica e higrometria, resultado do próprio material, da sua inércia térmica e da espessura da parede (Fig. 12);
- Absorve e filtra partículas poluentes, resultando num ambiente purificado e assim contribuindo para a diminuição do risco de doenças respiratórias;
- Capacidade de obstruir as ondas eletromagnéticas, que são nefastas para a saúde

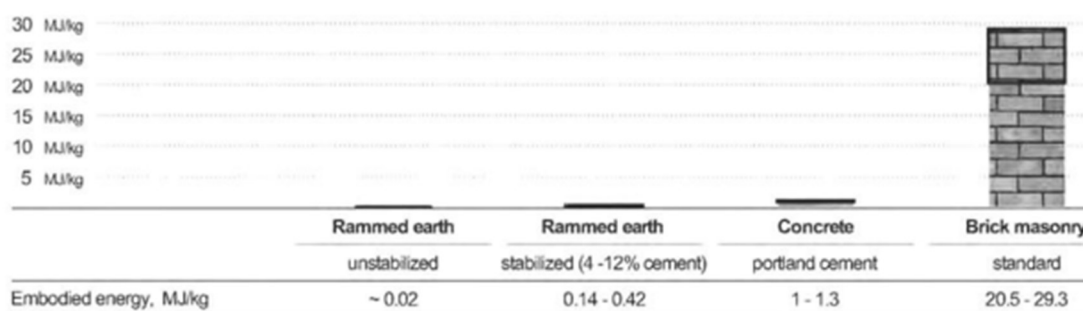


Fig. 11 – Gasto energético associado a diferentes parâmetros: taipa (não estabilizada e estabilizada), betão e tijolo

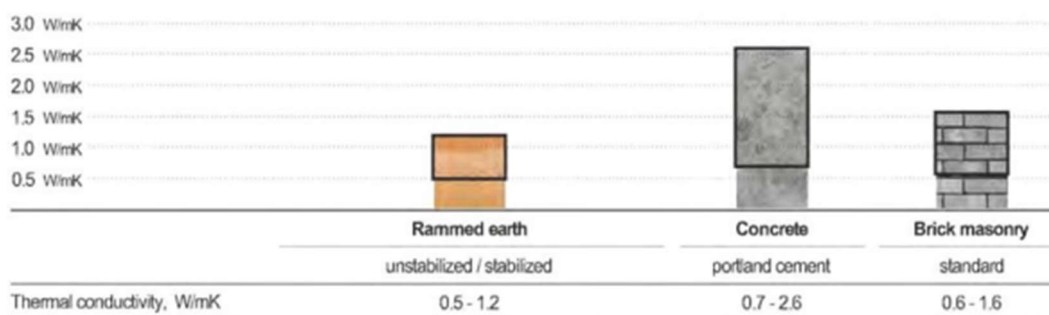


Fig. 12 – Condutividade térmica associada diferentes parâmetros: taipa, betão e tijolo

2.6.2. LIMITAÇÕES

- Fragilidade da matéria-prima visto que, em contacto com a água, origina lama e a ação do vento resulta na libertação de matéria sob o estado de poeira;
- Tem uma baixa resistência mecânica face a ações horizontais, pelo que não é uma opção para locais de risco sísmico elevado;
- Tempo de secagem é necessariamente demorado, para não permitir fendilhação em grande escala;
- Necessidade de certificação da matéria-prima que tem de ser feita individualmente, dado que a suas componentes e características são diferentes conforme o local de extração, não havendo uma normalização;
- Ausência de legislação específica para este método construtivo;
- Dificuldade em obter financiamento e empresas especializadas na construção em terra crua;
- Limitações formais, tais como baixa resistência mecânica, que não permite a construção em altura por razões associadas à vulnerabilidade aos sismos, sendo, todavia, indicada e segura para construções de 1 piso;
- Elevada sensibilidade à água, não sendo aconselhável em locais de cheias;
- Outra dificuldade relativa a esta matéria-prima prende-se com a retração da argila a que está sujeita, que pode originar deformações significativas durante a fase de secagem resultando em fissuras ou tensões [15][5].

2.6.3. VANTAGENS DO USO DE ADOBE EM RELAÇÃO A OUTROS SISTEMAS DE TERRA

O processo construtivo recorrendo ao adobe possui várias vantagens construtivas em detrimento a outros sistemas de construção como é o caso da taipa e do tabique:

- A forma de construção deste sistema, por se assemelhar à forma atual de construção da alvenaria de tijolo não exige uma técnica especializada;
- Dadas as suas dimensões, permite construir de forma rápida e versátil;

- Os blocos podem ser previamente preparados em outro local por pessoas com menos experiência, ou onde a matéria-prima seja mais disponível;
- A variedade de aparelhos permite construir paredes interiores e exteriores, para além, da construção de arcos, abóbadas e cúpulas, construções estas que dificilmente seriam possíveis de executar com recurso a outros sistemas de construção em terra.

O adobe foi também muito utilizado até mais tarde por ser uma alternativa económica ao fabrico de tijolos cozidos, permitindo um fabrico de baixo custo e um número variável de dimensões dos blocos.

2.7 SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA CONSTRUTIVO EM TERRA

A construção civil assume um grande impacto no meio ambiente e implica um elevado gasto energético. O uso de recursos em quantidades excessivas origina perdas por falhas e omissões nos projetos gerando, consequentemente, resíduos [27]. A elevada dependência pelos recursos naturais teve o seu auge na época da Revolução Industrial devido ao elevado crescimento económico e ao intenso crescimento da população. Ocorreu, durante essa fase, um consumo maior desses recursos, relegando para outro plano os problemas ecológicos e ambientais [28]. Nos últimos anos, tem existido uma preocupação ecológica neste domínio e uma tentativa de combate a problemas de cariz ambiental, por meio da definição e implementação de políticas e sistemas que possibilitem a proteção do ambiente e consequente desenvolvimento sustentável. O tema tem vindo a assumir uma crescente importância por parte da sociedade, tendo sido referido pela primeira vez no Relatório Brundtland – Our Common Future – no ano de 1987, que originou um trabalho de investigação a cargo da ONU onde o desenvolvimento sustentável foi definido como “*o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as próprias necessidades*” [29]. Têm, igualmente, sido feitas cimeiras e conferências com o a finalidade de definir objetivos e metas a serem legisladas e cumpridas quer a nível nacional como a nível internacional. No caso português, foi elaborado um plano designado de Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS) no ano de 2002 e tendo posteriormente sofrido alterações nos anos de 2007 e 2015. Este documento engloba um conjunto de programas de ações, por meio de organismos e entidades portuguesas, com o objetivo de potencializar um desenvolvimento económico, social e ambiental equilibrado [30].

Como mencionado anteriormente, tem ocorrido alterações no equilíbrio do planeta, consequência de políticas adotadas pelas sociedades, concretamente no que concerne ao consumo e gestão dos recursos naturais. Como resultado do crescimento da população e da longevidade humana, e carência por estes recursos tem sofrido um aumento exponencial, bem como os efeitos nefastos para o meio ambiente, resultado do incremento de emissões de CO₂ ou desflorestação. As percentagens de CO₂ na atmosfera têm sofrido um aumento substancial que se deve maioritariamente à combustão de combustíveis fósseis e prevê-se que as mesmas atinjam 40 milhões de toneladas no ano de 2030, valor muito elevado aquando da comparação com o início da Revolução Industrial onde o mesmo era praticamente nulo [31].

Uma das principais indústrias responsáveis pelo desenvolvimento económico e social da união europeia é o da construção, com um peso de 28,1% no setor do emprego e 7,5% no setor industrial. É, igualmente, um dos maiores responsáveis pela degradação ambiental, causada pelos níveis de CO₂ na utilização de matérias-primas (3000 ton/ano) e também na produção de resíduos (450 milhões ton/ano) relativas a este ramo [32]. Este setor simboliza perto de 10% das emissões totais de CO₂, sendo que a maior parte das mesmas está relacionada com a produção de betão. Os edifícios assumem várias fases

ao longo do seu ciclo de vida: concepção, operação e fim de vida, sendo que os resíduos originados em cada fase representam quota-parte dos dilemas ambientais, tendo a designação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). No que diz respeito à EU, estes vestígios dos RCD podem assumir valores de milhões de toneladas por ano, sendo que Portugal é responsável por cerca de 7,5 milhões de toneladas, o que representa 20% da quantidade total residual produzida no país. O setor construtivo, tem vindo a sofrer alterações com o objetivo de um melhor enquadramento das linhas de pensamento atuais que visam uma maior sustentabilidade nos parâmetros de concepção, construção, operação e demolição quer por meio do dimensionamento de infra-estruturas auto-suficientes quer por meio de uma construção que implique uma menor quantidade de recursos naturais [31]. É nesse sentido que a utilização do solo como material de construção se adequa, onde as propriedades e versatilidade do mesmo o tornam uma opção em comparação aos demais materiais e técnicas de construção convencionais [33].

O uso do solo como material de construção apresenta um conjunto de propriedades que lhe confere um grande potencial na resposta às carências ambientais e energéticas atuais.

A construção em terra, pressupõe que a extração do solo é feita a partir ou próxima da obra originando gastos energéticos de extração e produção de blocos bastante reduzidos em comparação ao uso de betão ou tijolo dado implicar baixas energia de transporte e ter habitualmente um processamento manual, sendo que quando é mecânico os gastos são inferiores aos dos processos usuais. Outra variável que favorece um baixo consumo energético é o processo de cura, onde a energia usada maioritariamente é a proveniente do sol, que consequentemente origina uma diminuição das emissões poluentes de CO₂, como mostra a Fig. 13.

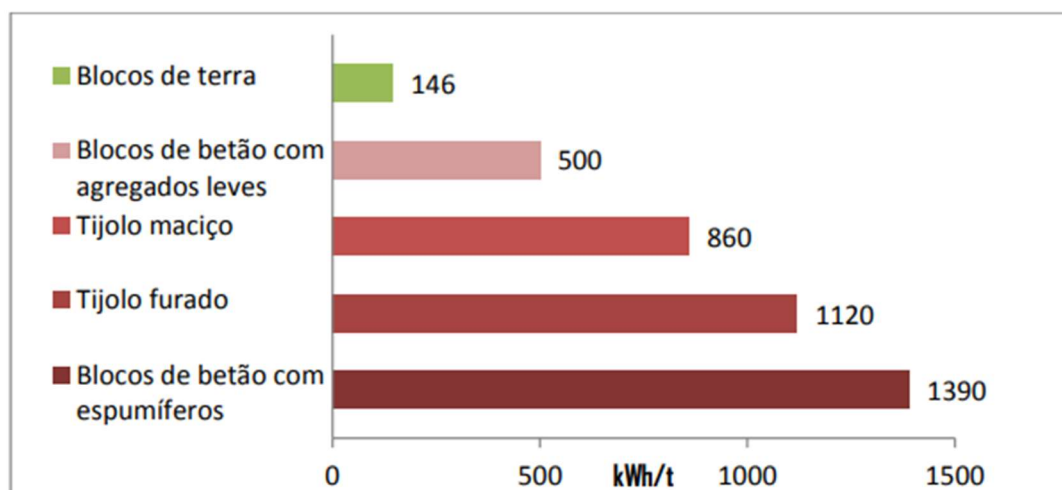


Fig. 13 – Energia usada em materiais para alvenaria [33]

Na produção de RCD na construção em terra, aquando da necessidade de estabilização do solo com outro material, o mesmo pode ser reaproveitado, originando a diminuição dos efeitos nocivos nesta fase em relação aos materiais usuais, o que permite que seja reutilizada sem a perda das características e qualidades inerentes [4].

A facilidade e velocidade de construção deste sistema construtivo, possibilita a redução de gastos energéticos e económicos bem como a facilidade em cumprimento de prazos. O uso do solo para a construção, é assim, e como referido anteriormente, um método bastante viável em relação aos sistemas construtivos convencionais, possuindo um conjunto de potencialidades que permite à sociedade pensar num futuro promissor e mais sustentável [32].

3

ENZIMA ENZYMAT

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo vamos abordar o tema referente à enzima desenvolvida e produzida na empresa MatsWay, relevando aspetos como a sua extração, a sua validação, requisitos para a correta utilização da mesma e fatores que contribuem para uma maior velocidade de reação.

Com o objetivo de conseguir a replicação de um produto enzimático próprio (EnzyMats), procurou-se obter uma solução multienzimática que se apresentasse viável para qualquer tipo de solo e com uma eficácia que fosse elevada já que uma das finalidades será a comercialização do produto.

O uso de solos com carências geotécnicas necessita da melhoria das suas propriedades naturais. Um dos mecanismos para esse melhoramento passa pela estabilização por meio da precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), designado também por bioestabilização.

A presença da enzima urease, é essencial para que ocorra a bioestabilização, podendo a mesma ser encontrada em meio natural, quer seja em plantas, leveduras ou bactérias.

Existem dois mecanismos para promover a precipitação do carbonato de cálcio, sendo eles por via bacteriana (MICP) ou por via enzimática (EICP). Quando se refere ao mecanismo por via bacteriana, é necessário que as bactérias obtenham o maior grau de produtividade no que diz respeito à obtenção da enzima urease. Deste modo, é essencial que sejam respeitados alguns fatores, mais concretamente fatores climatéricos, de pH, tempo de incubação e nutrientes específicos presentes no meio. No que concerne à via enzimática é um processo mais simples, dado que não envolve o cultivo e uso das bactérias, sendo apenas necessário a enzima urease, ureia e cloreto de cálcio.

Face à elevada complexidade inerente a todo o processo de cultivação e armazenamento de bactérias, que por norma requer condições ambientais próprias, foi adotado o método enzimático para promover a precipitação do carbonato de cálcio. Aqui entra o método EICP, Enzyme-Induced Calcite Precipitation, que se caracteriza por um processo que aumenta a coesão das partículas dos solos através da precipitação do CaCO_3 . A enzima urease é responsável por catalisar a hidrólise da ureia, levando assim à formação de carbonato e amoníaco, como demonstrado na equação (3.1)



A presença de iões cálcio origina a formação de um precipitado de carbonato de cálcio, que se traduz de acordo com a seguinte equação (3.2):



Estes íons de cálcio serão fornecidos pelo cloreto de cálcio, CaCl_2 , promovendo a atividade das reações, como se pode verificar na Fig. 14 quando existe a presença de íons cálcio e na Fig. 15 onde há ausência de Ca^{2+} podendo verificar-se uma comparação da quantidade de precipitado de CaCO_3 ao fim de 20 minutos.

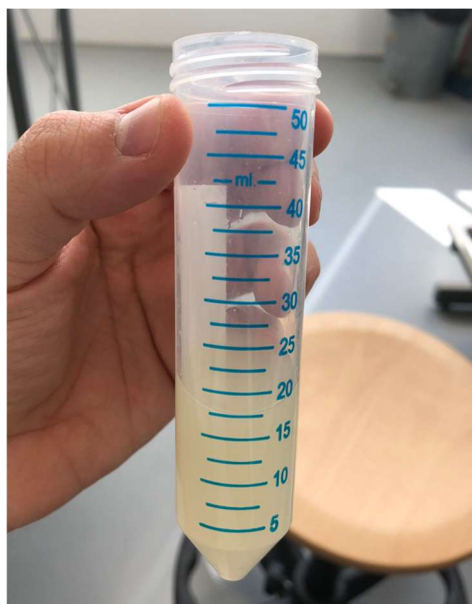


Fig.14 – Solução com Ca^{2+}

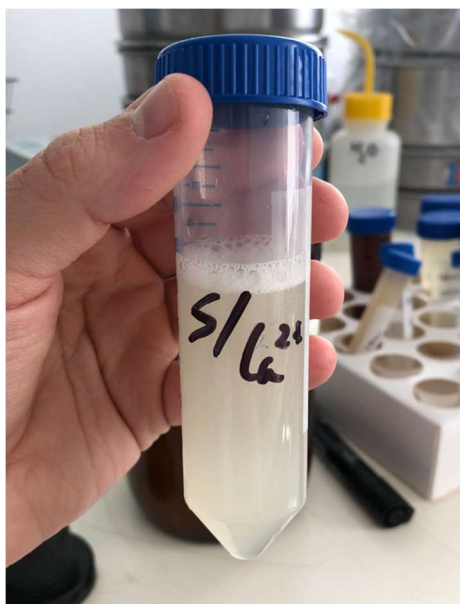


Fig. 15 – Solução sem Ca^{2+}

A precipitação do carbonato de cálcio foi obtida por via enzimática, como referido anteriormente, tendo-se procedido à mistura do solo com uma solução aquosa que contém os reagentes ureia e cloreto de cálcio e a enzima urease.

Para que uma enzima atue de forma eficiente são necessários 5 parâmetros fundamentais:

- Enzima funcional;
- Substrato adequado
- PH adequado à atividade da enzima;
- Temperatura (que influencia a velocidade da reação enzimática);
- Ausência de inibidores que possam impedir que a reação se processe.

3.2. FATORES QUE CONTRIBUEM PARA A VELOCIDADE DA REAÇÃO

Existem diversos fatores responsáveis por alterar a velocidade de uma reação enzimática tais como a concentração do substrato, oscilações de pH do meio em que se encontra a enzima e a variação de temperatura. Aquando de aumentos da concentração do substrato verifica-se aumento da velocidade de reação, no entanto no que diz respeito ao pH do meio e a aumentos de temperatura, as mesmas conduzem à desnaturação da enzima e conseqüente diminuição da velocidade de reação.

3.2.1. TEMPERATURA

As reações químicas são condicionadas pela temperatura. Quanto maior a mesma, mais rápida será a velocidade da reação. Este aumento da velocidade deve-se ao facto de mais moléculas obterem uma quantidade determinada de energia que possibilite o processo de transição. Em reações catalisadas por enzimas, o aumento de temperatura conduz a uma aceleração da reação até se atingir uma temperatura ótima a partir da qual a enzima opera com a maior taxa de eficiência. Sendo as enzimas proteínas, os valores indicados de temperatura ótima localizam-se entre os 40 e 45 °C. Para valores superiores de temperatura, verifica-se um declínio abrupto da atividade das enzimas por desnaturação proteica [34]. Para condições de temperaturas muito baixas, resulta na depressão da atividade enzimática como é visível na Fig. 16.

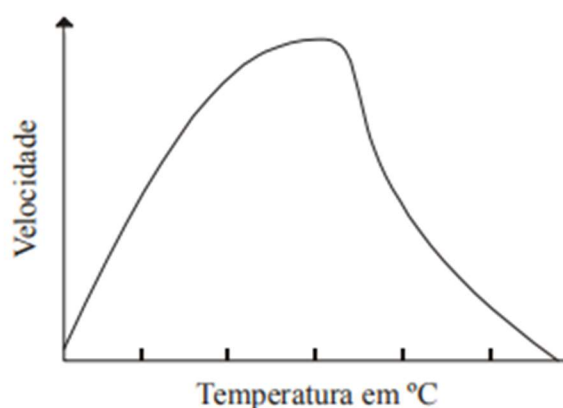


Fig. 16 – Ação da temperatura sobre a velocidade de uma reação catalisada por enzima [34]

3.2.2. PH

O pH apresenta um elevado impacto na atividade de uma enzima. Não obstante o facto de algumas enzimas suportarem largas variações de pH, uma grande parte delas apenas são ativas para intervalos reduzidos. O valor do pH para o qual a atividade da enzima apresenta o seu valor máximo denomina-se pH ótimo. Caso o pH do meio seja muito alcalino ou ácido em relação ao valor ótimo, resultará na desnaturação da enzima e, por conseguinte, impedimento da ligação entre o substrato e o local ativo da enzima e deste modo a reação será afetada. O gráfico da Fig. 17 esquematiza o efeito que o pH produz na atividade enzimática.

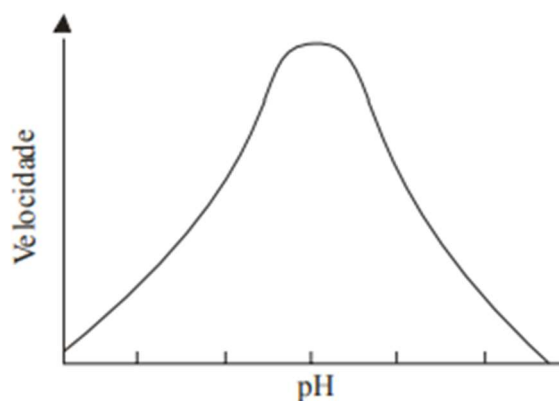


Fig. 17 – Efeito do pH na atividade da enzima [34]

3.2.3. CONCENTRAÇÃO DA ENZIMA

A concentração de enzima é uma variável que influencia a velocidade de uma reação enzimática e está dependente da quantidade de enzima disponível sendo que a velocidade inicial aumenta de forma proporcional aquando da adição de mais enzima ao meio como se verifica na Fig. 18.



Fig. 18 – Efeito da concentração de enzima sobre a velocidade inicial da reação [34]

3.2.4. CONCENTRAÇÃO DO SUBSTRATO

Com o objetivo de responder às necessidades do organismo, é necessário que as reações bioquímicas se processem a uma velocidade compatível. A velocidade de uma reação bioquímica é traduzida em função da formação de produto ou pelo consumo de reagente.

O mecanismo da reação é enunciado pela equação da velocidade (3.3)

$$velocidade = v = \frac{-\Delta [S]}{\Delta t} = k[S] \quad (3.3)$$

Onde:

$[S]$ = concentração de substrato

t = tempo

k = constante de velocidade

A concentração de substrato ($[S]$) apresenta um sinal negativo, dado que o mesmo é consumido durante a reação. Pela análise da equação, a velocidade da reação assume um comportamento de proporcionalidade direta em relação à concentração de substrato e a curva que descreve esta relação é de primeira ordem como mostra o gráfico da Fig. 19.

Quando deixa de existir adição de mais reagente, não há aumento da velocidade, pelo que estas se mantêm constantes, assumindo um comportamento cinemático de ordem zero, sendo que a velocidade de reação passa a ser descrita pela equação 3.4 [34]

$$velocidade = k[S]^0 = k \quad (3.4)$$

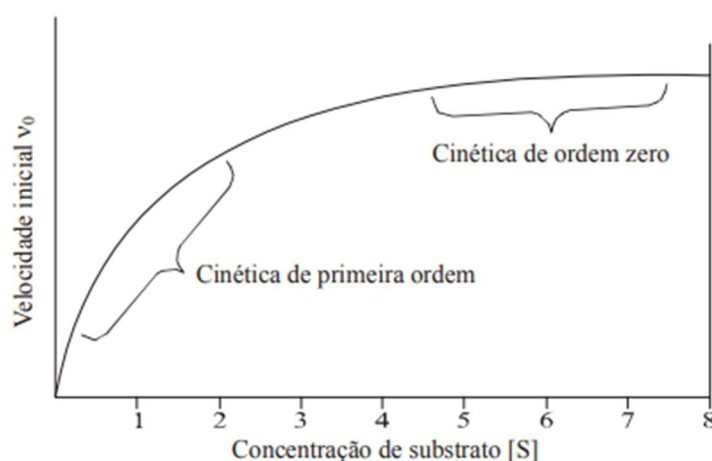


Fig. 19 – Relação entre a concentração de substrato S e a velocidade inicial v_0 em reações enzimáticas [34]

3.3. CINÉTICA ENZIMÁTICA

A avaliação da velocidade das reações enzimáticas inclui informações relativas ao processo catalítico, à especificidade das enzimas e a variáveis que influenciam a velocidade dessas mesmas reações. A quantificação da eficiência de uma enzima pode ser avaliada de acordo com a sua velocidade. Deste modo, a velocidade com que o substrato é convertido em produto em função do tempo, mediado por uma catálise de uma enzima é designada de cinética enzimática [35].

A variável que afeta a velocidade cinemática da enzima é a concentração de substrato [S], que durante toda a reação sofre alterações. Deste modo, revela-se mais eficaz medir a velocidade inicial V_0 para uma situação em que a concentração de substrato é muito superior à concentração da enzima. Para a determinação da velocidade máxima de uma reação, é necessária uma grande concentração de substrato como se verifica no gráfico da fig. 13. Deste modo, revela-se mais vantajoso o cálculo de $\frac{1}{2} V_{\text{máx}}$, sendo K_M a quantidade necessária de substrato para se atingir metade da velocidade máxima [34].

Numa reação enzimática como a enunciada na equação (3.5) verificamos a reação entre a enzima e o substrato. Trata-se de uma reação direta onde a velocidade é caracterizada por k_1 para formar o complexo enzima substrato, sendo k_{-1} a velocidade “inversa”, aquela que levaria à decomposição do complexo. Após a formação do complexo ES, existe a conversão do mesmo pela enzima no produto P, não havendo reação entre o produto e a enzima para voltar a decompor-se no complexo ES, sendo k_2 a constante de velocidade que representa a velocidade da reação (3.6)



3.3.1. ENZIMA ALOSTÉRICA E NÃO ALOSTÉRICA

As enzimas alostéricas as mesmas têm a sua atividade afetada por moléculas reguladoras alostéricas que estabelecem ligações a determinadas regiões da enzima, denominados por sítios alostéricos. A ligação estabelecida entre o regulador alostérico ao sítio alostérico pode aumentar ou diminuir a finalidade da enzima ao substrato, dado que os sítios ativos são dependentes entre si, e consequentemente afetar a sua atividade [36]. O gráfico da Fig. 20 mostra o comportamento de uma enzima alostérica



Fig. 20 – Esquema da reação de uma enzima alostérica [34]

No que concerne às enzimas não alostéricas (Fig. 21), a afinidade pelo substrato não é afetada por variáveis externas. A velocidade da reação é obtida através da concentração de substrato e não é afetada por outras moléculas, como é o caso dos ligantes ou inibidores. Existe, como foi referido anteriormente e se pode verificar no gráfico da Fig. 19, um aumento da velocidade com o aumento da concentração de substrato até a um ponto em que se atinge a velocidade máxima. A relação entre a concentração de substrato e a velocidade de reação pode ser traduzida pela equação de Michaelis-Menten, mecanismo este que apenas se pode aplicar no caso de enzimas não alostéricas [34] como é o caso da EnzyMats.

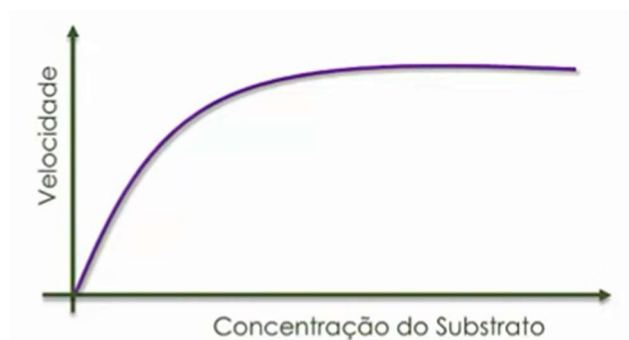


Fig. 21 – Esquema da reação de uma enzima não alostérica [34]

Para descrever o comportamento da reação e solucionar as equações descritas é necessário estabelecer condições de contorno. Numa primeira instância, assume-se um estado estacionário. O estado estacionário é o momento em que a concentração de substrato e a velocidade de reação atingem um estado de equilíbrio, pelo que não se verificam alterações dos mesmos ao longo do tempo. Esse momento ocorre quando a concentração de substrato é suficientemente alta, de modo que a enzima se encontre sempre complexada ao substrato. Deste modo, a velocidade de formação é igual à velocidade de decomposição como enuncia a equação (3.7), o que permite a obtenção da constante de Michaelis

K_M (3.8) que se assume como uma medida de afinidade enzimática utilizada na comparação entre enzimas.

$$\frac{d[ES]}{dt} = \frac{d[ES]}{dt} \quad (3.7)$$

$$K_M = \frac{k_{-1} + k_2}{k_2} \quad (3.8)$$

3.3.2. EQUAÇÃO DE MICHAELIS-MANTEN

Para o instante em que a enzima se encontra saturada, a concentração total de enzimas corresponde à concentração do complexo, ou seja $[ES] = [E]_T$, e diz respeito ao momento onde é atingida a velocidade máxima. Consequentemente, obtemos a equação de Michaelis-Menten (3.9) que é a equação que permite relacionar a variação da concentração de substrato com a velocidade da reação [34].

$$v = \frac{V_{max} [S]}{K_M + [S]} \quad (3.9)$$

Como foi referido anteriormente, a constante de Michaelis é um parâmetro que serve para avaliar a afinidade enzimática.

Quanto menor for a constante de Michaelis-Menten maior será a afinidade enzimática e mais rapidamente essa enzima irá atingir a velocidade máxima.

3.3.3. CONSTANTE CATALÍTICA

Sabendo que a velocidade máxima (3.10) ocorre aquando da saturação da enzima, podemos obter a equação da constante catalítica K_{cat} (3.11) que representa o número de reações catalisadas por uma molécula de enzima por unidade de tempo.

$$V_{max} = k_2 [E]_T \quad (3.10)$$

$$k_2 = \frac{V_{max}}{[E]_T} = K_{cat} \quad (3.11)$$

3.3.4. EFICIÊNCIA CATALÍTICA

Outro parâmetro usado na avaliação de uma enzima é a eficiência catalítica (3.12) que reflete a capacidade de uma enzima para acelerar a reação em relação à concentração do substrato. Quanto maior a eficiência catalítica, mais rapidamente se processará a reação enzimática para concentrações intermediárias do substrato, o que demonstra que a enzima é mais eficiente na realização da reação.

$$\eta = \frac{K_{cat}}{K_M} = \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \quad (3.12)$$

3.3.5. EQUAÇÃO DO DUPLO RECÍPROCO DE LINEWEAVER-BURK

Os valores do K_M e da v_{max} de uma enzima são obtidos pela medida das velocidades iniciais para diferentes concentrações de substrato. A obtenção mais exata desses valores é feita através da alteração algébrica da equação de Michaelis-Menten (3.9), usando o inverso da mesma como é enunciado pela equação de Lineweaver-Burk (3.13) [37].

$$\frac{1}{v} = \frac{K_M}{v_{max}} \frac{1}{[S]} + \frac{1}{v_{max}} \quad (3.13)$$

A representação gráfica que relaciona $\frac{1}{v}$ com $\frac{1}{[S]}$, fornece uma linha reta com declive $\frac{K_M}{v_{max}}$. O ponto onde ocorre interseção com o eixo das ordenadas resulta em $\frac{1}{v_{max}}$, e a interseção com o eixo das abscissas é igual a $-\frac{1}{K_M}$. Por conseguinte, é possível determinar de forma rigorosa as variáveis v_{max} e K_M como é visível no gráfico da Fig. 22.

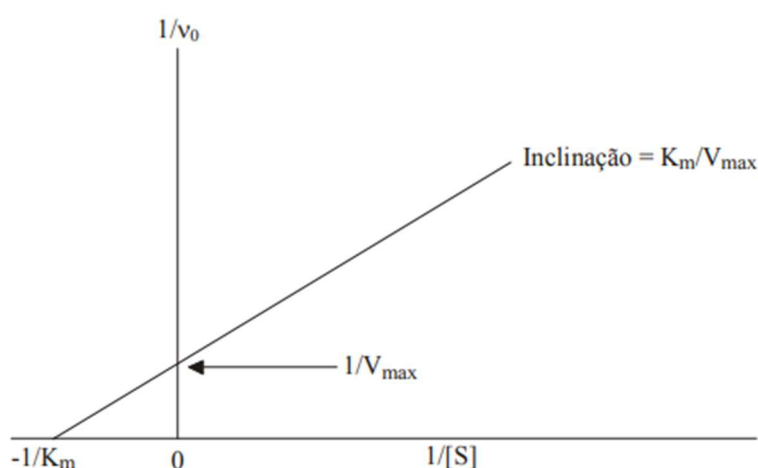


Fig. 22 – Cálculo de V_{max} e k_m a partir do gráfico de Linewaver-Burk [34]

3.4. EXTRAÇÃO DA ENZIMA UREASE A PARTIR DA SOJA

Deste modo, foi feito recurso à soja para se extrair da mesma, por meio de um processo mecânico, a enzima urease, para que, e como referido anteriormente, seja possível ocorrer a precipitação do carbonato de cálcio.

Método da Extração da Soja:

- 1º - Partir a soja em partículas mais pequenas com recurso a um pilão (fig. 23);
- 2º - Peneirar o produto obtido no peneiro de malha 250 (fig. 24);
- 3º - Colocar na gravimétrica para simular um mecanismo de agitação (fig. 25);
- 4º - Colocar os passados num recipiente e os retidos em outro (fig. 26);
- 5º - Utilizar o produto passado, pesar 1 grama do mesmo, colocar num tubo de ensaio e repetir para mais tubos de ensaio (fig. 27);
- 6º - Adicionar 10 mL de água destilada em cada tubo de ensaio e misturar (fig. 28 e fig. 29);
- 7º - Colocar na centrífugadora (capacidade de 6 tubos de ensaio) e centrifugar durante 20 minutos a 3000 rpm (fig 22).



Fig. 23 – Moagem das partículas de soja com recurso a um pilão



Fig. 24 – Peneiração das partículas na malha 250mm



Fig. 25 - Gravimétrica



Fig. 26 – Separação entre retidos e passados



Fig. 27 – Pesagem de 1g de passados



Fig. 28 – Adição de água destilada aos tubos de ensaio



Fig. 29 – Solução obtida após mistura



Fig. 30 - Centrifugadora

3.5. VALIDAÇÃO DA ENZYMATs

Após o processo de extração da bioenzima urease recorrendo a uma fonte vegetal, é essencial que a mesma passe por um processo de validação. São conhecidos dois métodos, sendo o primeiro o método SDS-PAGE, técnica realizada com o objetivo de separar moléculas de acordo com o seu tamanho e carga elétrica para que assim seja verificada a presença de proteínas. Para a EnzyMats, adotou-se uma técnica laboratorial, onde a olho nu, era visível a presença de partículas em suspensão, resultantes da degradação do substrato que permitiram concluir a presença de carbonato de cálcio em suspensão e consequente validação da enzima como mostra a Fig. 31.



Fig. 31 – Amostra de solução com partículas em suspensão

3.6. CRITÉRIOS ESPECÍFICOS PARA O USO DA BIOENZIMA

Para o correto uso das bioenzimas estabilizadoras, estas requerem condições próprias. Assim, para o correto uso da EnzyMats, é necessária que esta obedeça a determinados critérios, pelo que tem que observar requisitos específicos que estão a ser avaliados para a EnzyMats, apresentando-se seguidamente requisitos para algumas enzimas comercializadas, como se pode extrair da Tab. 2.

Tab. 2 – Requisitos granulométricos para a utilização da bioenzima

Peneiro	% 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)

Para uma eficiente aplicação da solução, é fundamental a realização de testes que verifiquem a afinidade entre o solo e o produto, obtendo-se, por meio de uma análise granulométrica as percentagens de seixo, areia e argila bem como os limites de Atterberg que englobam o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). A determinação destes limites, permite obter conclusões sobre o comportamento do solo na presença de água.

4

CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E OBTENÇÃO DA PERCENTAGEM ENZIMÁTICA ÓTIMA

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo tem como objetivo a caracterização e classificação de dois solos, por meio da análise e obtenção da sua composição granulométrica, abordando os limites de consistência, o teor ótimo de humidade e baridade seca máxima e também a determinação do equivalente de areia. De igual modo, o presente capítulo terá também como foco a determinação de uma percentagem enzimática ótima e de que forma a presença ou não de um aditivo específico influencia o comportamento dos solos em estudo. Complementarmente, foram realizados ensaios para os dois solos, e feita uma breve descrição dos mesmos bem como dos materiais utilizados.

Numa primeira estância, foi analisado o solo S1, obtido da própria região de Aveiro, de um estaleiro próximo da empresa MatsWay, tendo sido retiradas amostras do mesmo com recurso a uma pá e guardadas posteriormente em sacos, como demonstra a Fig. 32. A partir da análise do solo S1, foi possível obter a percentagem ótima da enzima a usar em termos percentuais, realizando assim uma análise do solo S2 também da região, com o objetivo de validar os resultados obtidos para S1.



Fig. 32 – Colheita de solo S1 na região de Aveiro

4.2.

CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DE S1 E S2

O conhecimento das características e propriedades de um solo são essenciais para se compreender e de certa forma prever o seu comportamento. Parâmetros, tais como limites de consistência, teor ótimo de humidade ou fração argilosa evidenciados nas Tabelas 3 e 4, são fundamentais para essa compreensão e previsão comportamental.

Tab. 3 – Caracterização do Solo S1

Características	Valor/Descrição
Índice de Plasticidade (IP)	14%
Limite de Liquidez (LL)	26%
Limite de Plasticidade (LP)	12%
Fração Argilosa	19.6%
Classificação do solo	Areia siltosa
Teor ótimo de humidade	8.1%
Baridade seca máxima	2.09 g/cm ³

Tab. 4 – Caracterização do Solo S2

Características	Valor/Descrição
Índice de Plasticidade (IP)	20%
Limite de Liquidez (LL)	36%
Limite de Plasticidade (LP)	16%
Fração Argilosa	19.6%
Classificação do solo	Areia silto-argilosa
Teor ótimo de humidade	9.0%

4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE S1 E S2

Para a correta distribuição granulométrica dos solos, foram efetuados os procedimentos mencionados na especificação E 196 – 1966 do LNEC. De acordo com esta norma existem dois procedimentos diferentes a realizar de acordo com a dimensão das partículas do solo: a peneiração e a sedimentação. A peneiração tem por base a determinação dos diâmetros das partículas do solo que tenham um tamanho superior ou igual a 0.075mm (peneiro #200). Este procedimento resulta da passagem das partículas do solo por peneiros com malhas quadradas cada vez mais pequenas, por meio de movimentos de translação e rotação que possibilitem obter uma estimativa da percentagem retida em cada peneiro e, assim, obter a curva granulométrica relativa à fração grossa. No que concerne ao

processo de sedimentação, o mesmo consiste na obtenção do diâmetro de partículas inferiores a 0.075mm (peneiro #200) por meio da velocidade da sedimentação das mesmas, através da Lei de Stokes. Pela curva granulométrica evidenciada na Fig. 33, o solo S1 apresenta uma fração fina de 19,6% e um material grosseiro inferior a 12,5 mm, estando igualmente representada a curva granulométrica de S2 na Fig.34.

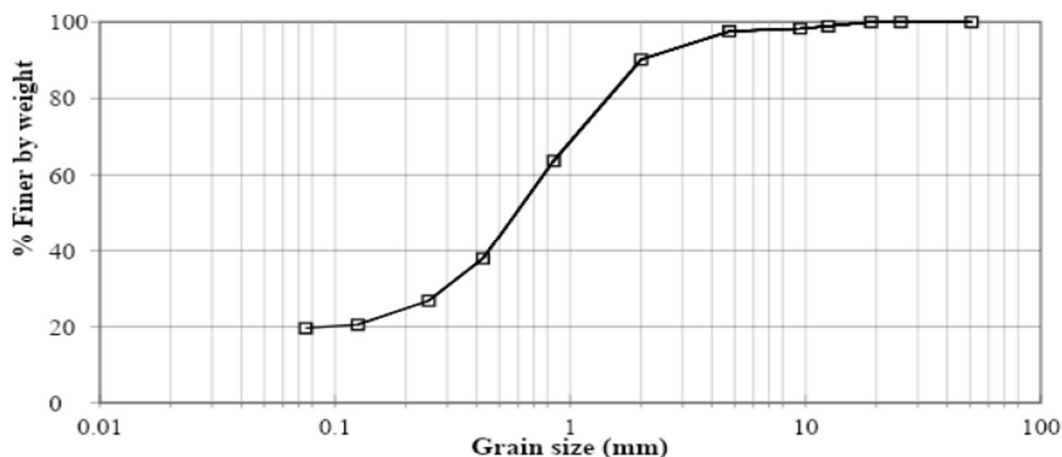


Fig. 33 – Curva granulométrica do solo S1

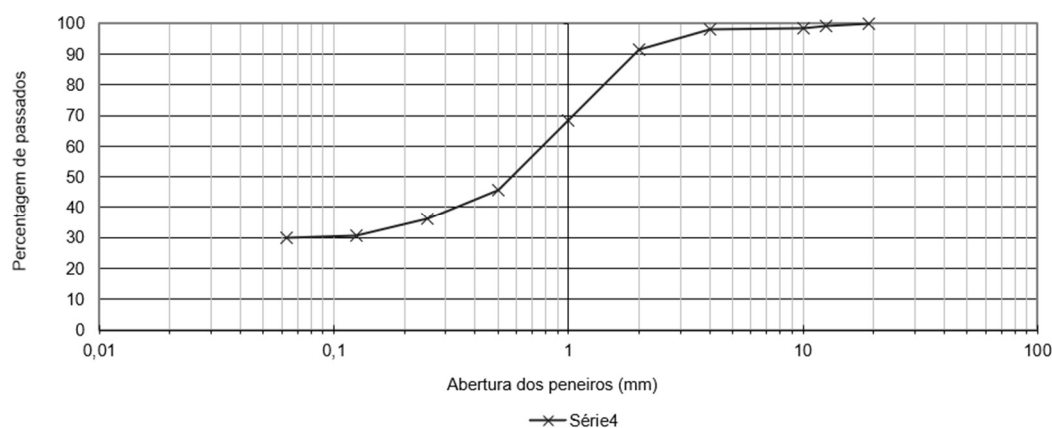


Fig. 34 – Curva granulométrica do solo S2

4.2.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

No que diz respeito ao cálculo dos limites de consistência também designados por limites de Atterberg, estes incluem o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). A determinação destes limites permite obter conclusões sobre o comportamento de um solo na presença de água e os mesmos são obtidos segundo a norma NP-143 (1969). Uma vez que as frações mais finas são as que apresentam maior grau de instabilidade, é sobre essas que calculam os limites de liquidez e plasticidade.

- Limite de Liquidez: o limite de liquidez é calculado na Concha de Casagranede, e é apenas aplicável a solos com cerca de 30% ou mais, de partículas com tamanho inferior a 0,05mm.
- Limite de Plasticidade: o limite de plasticidade é o teor que separa os estados friável e plástico, e é classificado de acordo com o teor em água que faz corresponder à quebra de um filamento de solo com 3 mm, após rolamento entre a palma da mão e uma placa de vidro. O solo S1 apresenta um limite de plasticidade de 12% enquanto o S2 tem um LP de 16%.
- Índice de Plasticidade: o índice de plasticidade representa a gama de teores em água onde o solo apresenta um comportamento plástico e estabelece uma relação com o valor máximo da variação de volume de um solo (retração). Determina o caráter de plasticidade de um solo, e quanto maior o valor de “IP” mais plástico será o solo. É dado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (4.14), sendo 12 o valor do LP no solo S1.

$$IP = LL - LP \quad (4.14)$$

4.2.3. ENSAIO PROCTOR DO SOLO S1

Para o cálculo do teor ótimo de humidade do solo e da baridade seca máxima, foi realizado o ensaio de Proctor respeitando a norma LNEC E 197 – 1966. O ensaio foi efetuado com recurso a um molde cilíndrico onde foram feitas 5 camadas que foram submetidas a 25 pancadas por meio de um pilão de peso normalizado. Para se proceder à compactação, acrescenta-se uma quantidade de água destilada ao solo homogeneizando. Como está representado na curva de compactação da Fig. 35, o valor obtido para o teor ótimo de humidade é de 7,8% e a baridade seca máxima é de 2,08 g/cm³.

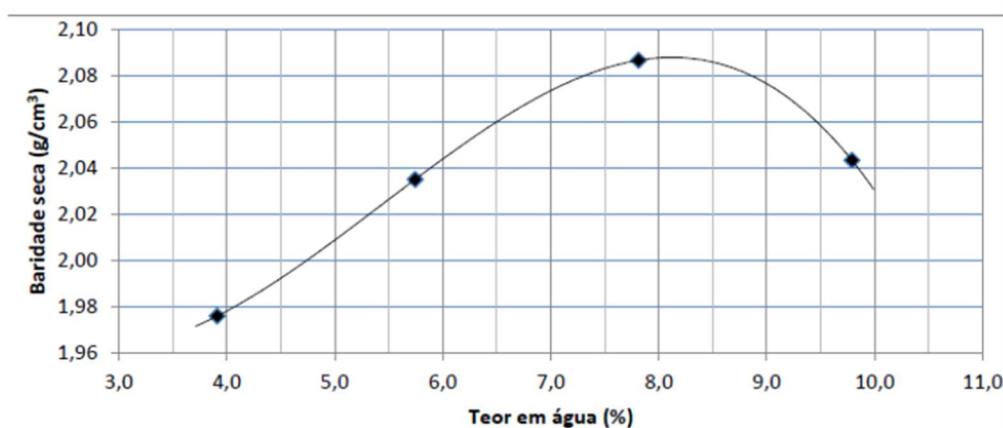


Fig. 35 – Curva do ensaio Proctor do solo S1

4.2.4 EQUIVALENTE DE AREIA

Foi realizado o ensaio de equivalente de areia, para determinar o equivalente de areia do solo em estudo, realizado de acordo com a norma E 196 - 1966 do LNEC. Envolve a separação das partículas do solo em frações granulométricas distintas por meio da peneiração e consequente determinação da massa de cada volume. É posteriormente calculado pela soma dos percentuais de partículas com diâmetro entre 0,063 mm e 2 mm dividido pela soma dos percentuais de partículas com diâmetro inferior a 0,063 mm. Foram ensaiadas duas provetas, proveta 11 e 12 (Fig. 36).

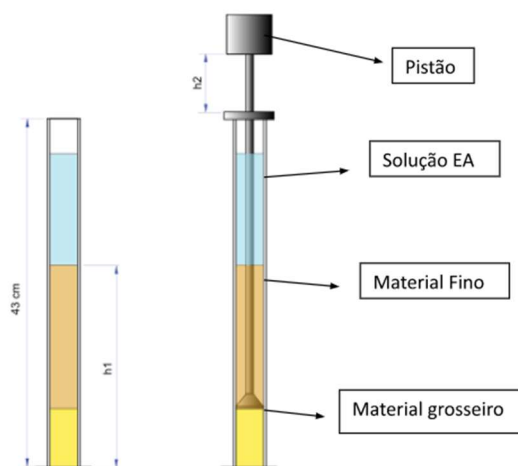


Fig. 36 – Procedimento para obtenção do Equivalente de Areia

Para o cálculo do EA, recorreu-se à equação:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (4.15)$$

Obteve-se no caso da proveta 11 um EA de 25,9% e para a proveta 12 um EA de 32,5%. Para se obter um valor para a sub-amostra, realizou-se uma média simples dos dois valores chegando ao valor de 29,2%.

4.2.5. CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA DE S1 E S2

Para a classificação do solo em análise foi usada a norma ASTM D 2487 (1998), que permitiu concluir que S1 se trata de uma areia siltosa e S2 de uma areia silto-argilosa.

4.3. DOSAGEM ÓTIMA ENZIMA + ADITIVOS

Para se encontrar a dosagem ótima da solução, foram realizadas várias misturas dos solos S1 e S2 com 3 dosagens diferentes, como indicado na Tab. 5.

Tab. 5 – Dosagens de enzima e aditivos utilizadas em S1 e S2

	Aditivos		V aditivo CaCl ₂ (mL)	V aditivo Ureia (mL)	V enzima (mL)	% (v/v)
Concentração	Ureia	CaCl ₂				

1	1 mol/L	0.7 mol/L	5	1	5	6.25
			10	5	10	12.50
			20	10	20	25.00
2	2 mol/L	1.4 mol/L	5	5	5	6.25
			10	10	10	12.50
			20	20	20	25.00
3	2.5 mol/L	1.75 mol/L	5	5	5	6.25
			10	10	10	12.50
			20	20	20	25.00

Procedimento:

1. Preparar 100mL das diferentes soluções de acordo com as concentrações pretendidas;
2. Adicionar numa proveta um determinado volume de solução de ureia, da urease extraída e de cloreto de cálcio;
3. Perfazer o volume com água até 80mL – teor ótimo de humidade obtido no Ensaio de Proctor;
4. Produção de provetes (3) para cada uma das soluções EICP preparadas.
5. Passados 7 e 14 dias, avaliar o desempenho mecânico quando submetidas ao Ensaio de Marshall.

Primeiramente, foi testada uma solução com uma concentração de 0,7 mol/L de CaCl_2 e 1 mol/L de $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$. Foram pipetados 0,5 mL de cloreto de cálcio de ureia e de urease, como está esquematizado na Fig. 37. Foi adicionada água até atingir o teor ótimo de humidade do solo (80mL). Posteriormente, para os outros ensaios, fez-se variar o volume de enzima e dos aditivos. Foram obtidas soluções finais com 6,25%, 12,5% e 25% de enzima face ao teor ótimo, como verificado na Tab. 6.

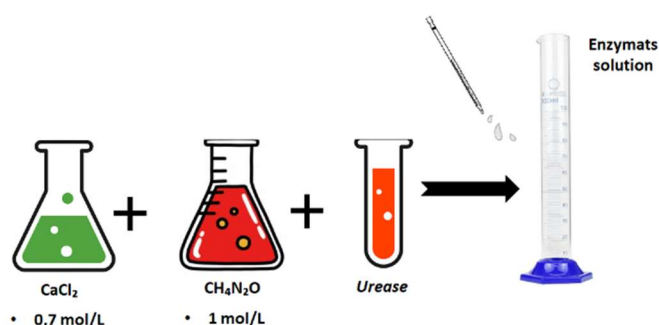


Fig. 37 – Esquematização da obtenção da solução enzimática

Tab. 6 – Percentagens finais da solução enzimática obtidas

Ensaio	V CaCl ₂ (mL)	V CH ₄ N ₂ O (mL)	V urease (mL)	Enzima (%)
1	5	5	5	6.25
2	10	10	10	12.50
3	20	20	20	25.00

4.3.1. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S1

Para a determinação da influência enzimática na deformação e estabilidade foi realizado o ensaio de compressão Marshall, ensaiando os provetes aos 7 (anexos A.1.1; A.1.7), 14 (anexos A.1.3; A.1.9) e 28 dias (anexos A.1.5; A.1.11) para o solo S1.

Este ensaio, tem como base a preparação dos provetes Marshall compactados de acordo com a norma EN 1269-30, e posterior cálculo da estabilidade, deformação e quociente Marshall, recorrendo a métodos definidos e registados em conjunto com a massa volúmica do provete.

É importante, na realização deste ensaio, ter conhecimento dos seguintes termos:

Estabilidade (S) – Valor máximo da resistência à deformação de um provete moldado da mistura expresso em kilonewtons (kN).

Deformação (F) – Diferença em milímetros (mm) entre a deformação aquando da rotura do provete e a deformação conseguida extrapolando até zero a tangente do gráfico da carga função da deformação.

Quociente Marshall (S/F) – Quociente entre a estabilidade e deformação.

Foram realizados, numa primeira fase, ensaios onde foi adicionada ao solo a enzima em diferentes percentagens e posteriormente foram também feitos ensaios aos provetes onde foi adicionada a enzima e um aditivo. Numa fase inicial, foi feita a preparação dos provetes. Os mesmos sofreram um processo de compactação por meio de um compactador para ensaios Marshall e por meio de 12 pancadas em cada face do provete. Posteriormente foram desmoldados como mostra a Fig. 38. Após o desmolde dos provetes, os mesmos foram pesados e foi feita a medição da altura e diâmetro (anexos A.1.2; A.1.4; A.1.6; A.1.8; A.1.10; A.1.12), sendo realizadas medições em três pontos e calculada a média para obter um valor mais preciso.



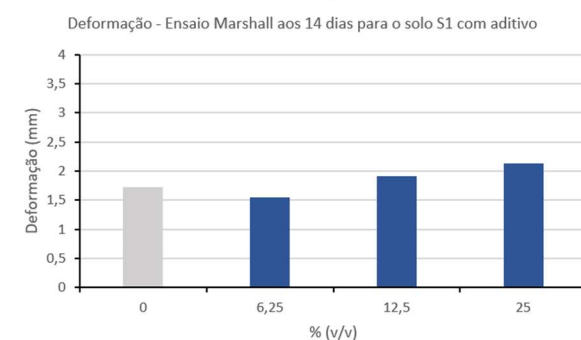
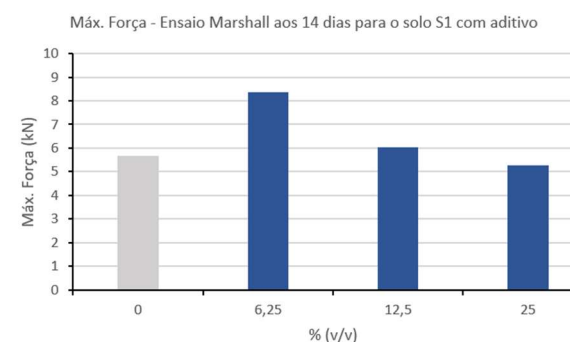
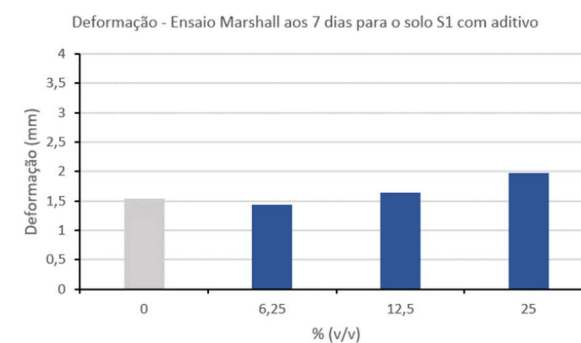
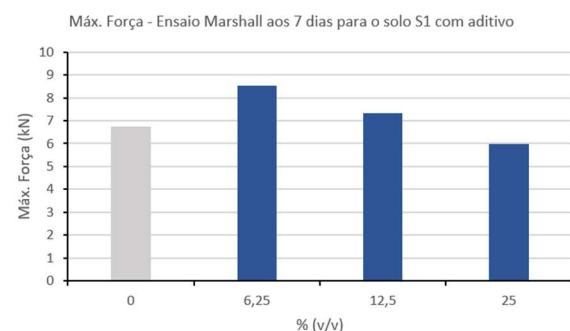
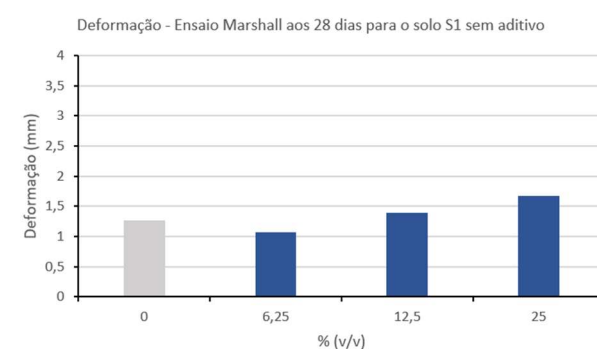
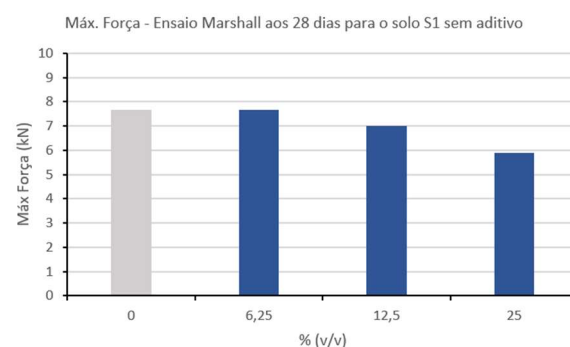
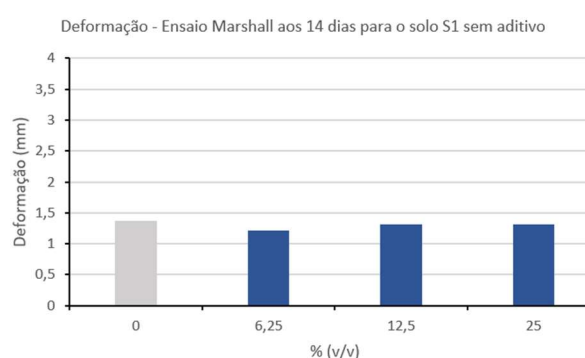
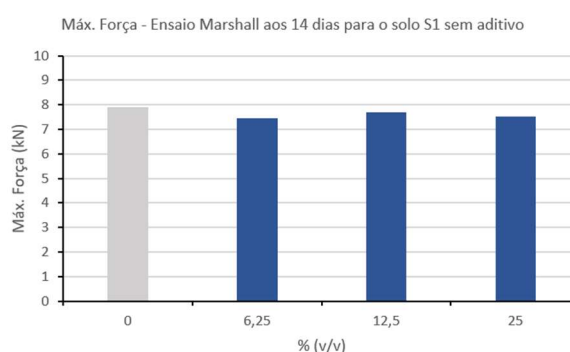
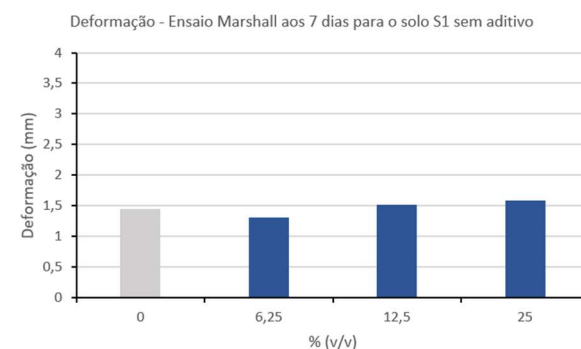
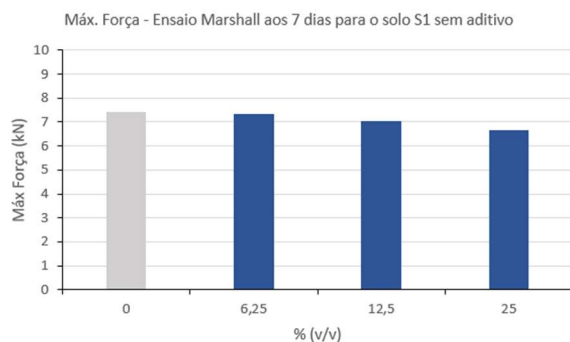
Fig. 38 - Mecanismo de desmolde dos provetes com recurso a macaco hidráulico

Foram ensaiados 24 provetes onde se manteve constante a percentagem do teor ótimo de humidade e se fez variar a percentagem enzimática e a presença ou ausência de aditivo como mostra a Tab. 7.

Tab. 7 – Composição dos provetes com S1 submetidos ao ensaio Marshall

	Solo	% Teor ótimo de humidade	% Enzimática	Aditivo
7 dias	S1	8.1	0	Sem
			6,25	
			12,5	
			25	
14 dias	S1	8.1	0	Sem
			6,25	
			12,5	
			25	
28 dias	S1	8.1	0	Sem
			6,25	
			12,5	
			25	
7 dias	S1	8.1	0	Com
			6,25	
			12,5	
			25	
14 dias	S1	8.1	0	Com
			6,25	
			12,5	
			25	
28 dias	S1	8.1	0	Com
			6,25	
			12,5	
			25	

Após a realização do ensaio de compressão em prensa Marshall, e como evidenciam os gráficos da Fig. 39 é possível comparar os valores da máxima força aplicada, bem como da deformação correspondente, avaliando a influência da variação enzimática, bem como da presença ou ausência de aditivo.



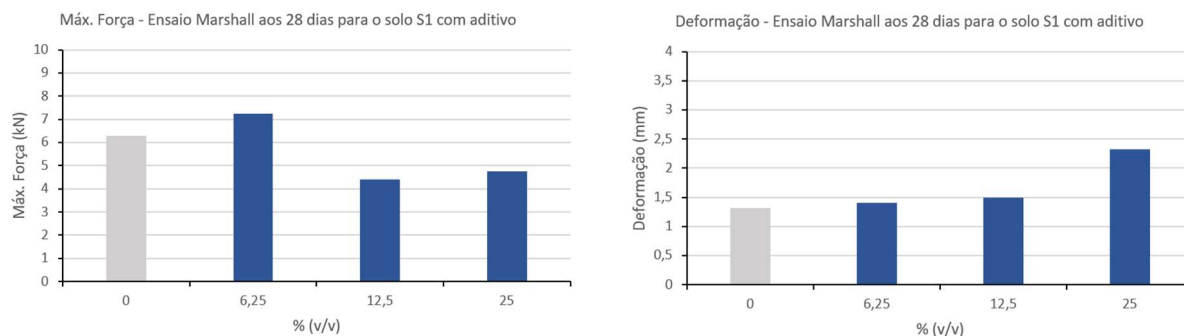


Fig. 39 – Ensaio Marshall para o solo S1

A análise dos gráficos permite concluir que os provetes ensaiados apresentam um melhor comportamento para uma percentagem enzimática de 6,25% avaliada pela máxima força e pela deformação registadas. Por outro lado, os provetes que apresentam pior comportamento, são aqueles que têm uma percentagem de EnzyMats maior (25%), registando uma força máxima menor e apresentado uma maior deformação correspondente, o que indica uma possível saturação excessiva do solo, e comprometimento da coesão e características do mesmo. Aquando da adição de aditivo, verifica-se que os provetes de adobe conseguem suportar uma força maior em relação aos provetes sem aditivo o que permite concluir que o mesmo confere um maior grau de coesão ao solo. Os resultados para os diferentes tempos de cura, 7, 14 e 28 dias revelam-se homogêneos, pelo que é possível tirar conclusões do comportamento do solo e considerar viáveis os resultados obtidos ao fim de 7 dias.

4.3.2. ENSAIO UCS PARA O SOLO S1

Foi igualmente realizado o ensaio de compressão não confinada (UCS) em provetes de adobe para a determinação dos parâmetros mecânicos (resistência e deformabilidade) mediante a aplicação de um carregamento axial com controlo da deformação, para, também, obter a dosagem enzimática ótima. Este ensaio foi realizado respeitando a Norma ASTM D-2166.

Numa fase inicial foi feita a pesagem de 2470 g de solo e, posteriormente, foi adicionado o teor ótimo de água, para o controlo como mostra a Fig. 40. A obtenção do teor ótimo de água, foi realizada, como mencionada anteriormente, através do ensaio Proctor sendo de 8% da quantidade total de massa (198mL). No que concerne às enzimas, avaliou-se, à semelhança do ensaio Marshall, as seguintes percentagens $\frac{v}{v}$, 6,25%, 12,5% e 25%. Foram efetuados provetes triplicados, obtidos por compactação dinâmica para permitir a obtenção de resultados homogêneos sendo avaliados aos 7 (anexos A.2.1; A.2.5) e 14 dias (anexos A.2.3; A.2.7).



Fig. 40 – Adição do teor ótimo de água ao solo

Posteriormente, o solo foi sujeito a uma compressão de 80 kN como visível na Fig. 41, sendo depois desmoldado com recurso a um macaco hidráulico. Seguidamente, determinou-se, com auxílio de um medidor, 3 medidas do diâmetro e da altura (anexos A.2.2; A.2.4; A.2.6; A.2.8) do provete e procedeu-se à sua pesagem ficando com o aspeto dos provetes da Fig. 42. Consequentemente, com os resultados anteriores, foi possível obter a área, o volume e a massa específica de cada provete.



Fig. 41 – Molde usado para o ensaio UCS



Fig. 42 – Provetes finais após desmoldagem

Após 7 e 14 dias, os provetes foram testados numa prensa que permite o controlo do deslocamento. A carga axial é medida pela célula de carga e a velocidade pré-estabelecida ao ensaio é controlada pela própria prensa. A velocidade de deformação axial específica deve ser constante e estar entre 0,5 e 2 % da altura do provete por minuto do ensaio. Para os ensaios em questão, foi estabelecida uma deformação específica de 2% por minuto, ou seja, a velocidade estabelecida foi de 2 mm por minuto. Quando se atingiu o pico do carregamento, o corpo de prova apresentou fissuras na lateral como mostra a Fig. 43 até ao instante em que a força axial decaí, resultando assim na rotura. Deste modo, foi possível obter a deformação e a máxima força quando submetidos à compressão.



Fig. 43 – Provete fissurado após ensaio UCS

Foram ensaiados 16 provetes, aos 7 e aos 14 dias como evidencia a Tab. 8, mantendo-se constante a percentagem do teor ótimo de humidade e fazendo variar a percentagem de EnzyMats bem como a presença ou ausência de aditivo.

Tab. 8 – Composição dos provetes com S1 submetidos ao ensaio UCS

	Solo	% Teor ótimo de humidade	% Enzimática	Aditivo
7 dias	S1	8.1	0	Sem
			6,25	
			12,5	
			25	
14 dias	S1	8.1	0	Sem
			6,25	
			12,5	
			25	
7 dias	S1	8.1	0	Com
			6,25	
			12,5	
			25	
14 dias	S1	8.1	0	Com
			6,25	
			12,5	
			25	

Foram, deste modo, e como referido anteriormente, determinados os parâmetros mecânicos (máxima força e deformação), e consequentemente, realizada uma comparação do comportamento dos provetes como mostram os gráficos da Fig. 44.

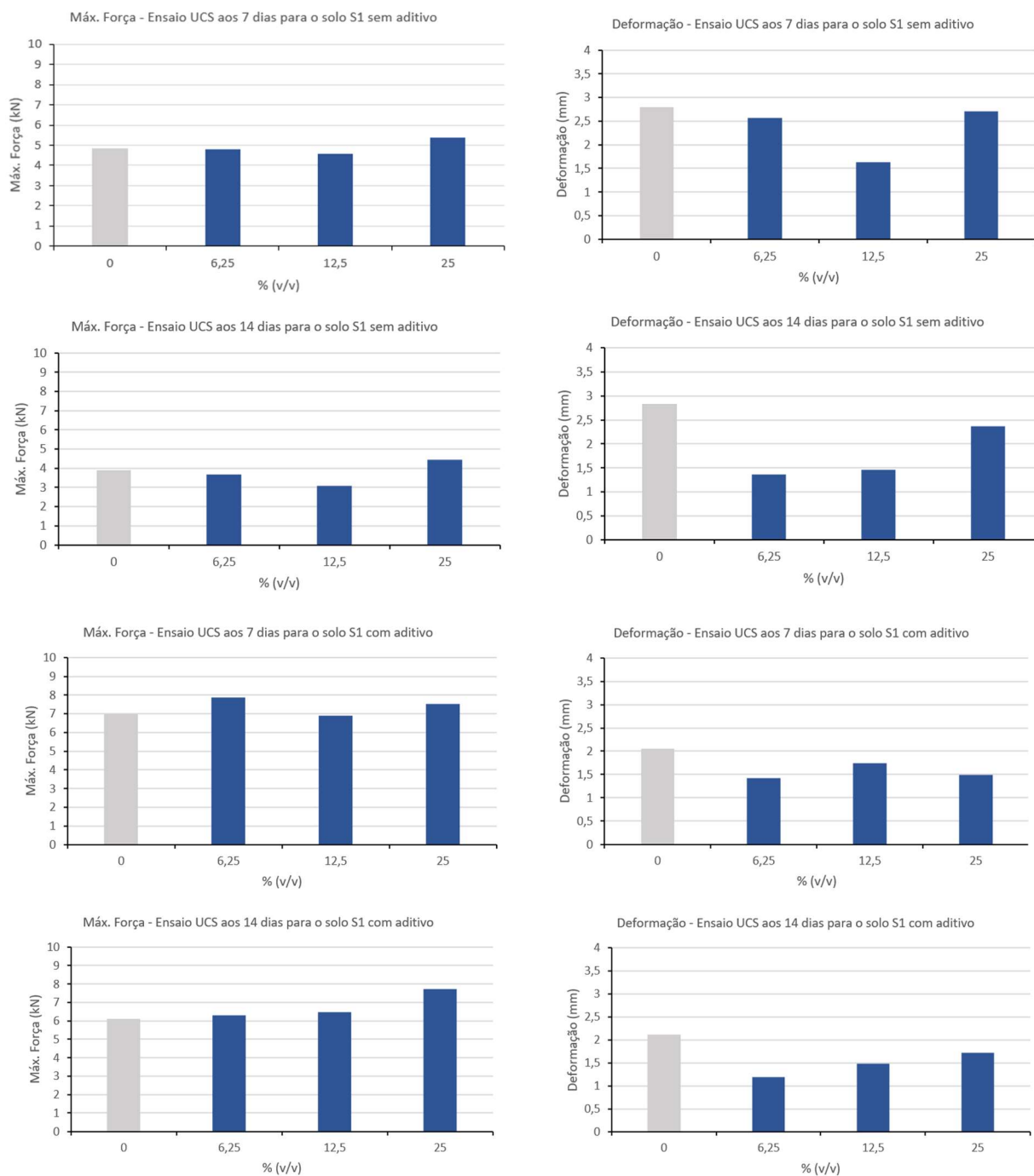


Fig.44 – Ensaio UCS para o solo S1

Com efeito, a análise dos gráficos, permite inferir, que ao contrário do ensaio Marshall, os resultados obtidos não assumem um grau de homogeneidade que permita concluir com segurança qual a melhor percentagem enzimática a utilizar no solo.

Existe, dos 7 para os 14 dias uma variação na máxima força, sendo que a mesma decresce para as diversas percentagens de enzima e presença ou ausência de aditivo. No entanto, é possível verificar que para uma percentagem enzimática de 6,25% dos 7 para os 14 dias é onde se verificam os resultados mais satisfatórios tanto com ou sem aditivo, uma vez que apesar de não suportar sempre a máxima força apresenta bons indicadores no que concerne à deformação, visto ser para esta percentagem que a mesma apresenta melhores resultados ao fim de duas semanas.

4.3.3. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S2

Tendo em conta os ensaios realizados e consequentes resultados obtidos, conclui-se que o ensaio Marshall se revela o mais favorável e indicado para a obtenção da percentagem ótima da enzima EnzyMats.

Deste modo, à semelhança do solo S1, foi realizado para o solo S2 o ensaio de compressão Marshall, sendo que para este solo foram apenas estudadas as percentagens enzimáticas de 6,25 e 12,5, visto serem aquelas que apresentaram melhores resultados nos ensaios anteriores, analisando-se também a presença ou ausência de aditivo. Foram igualmente efetuados 3 provetes para cada caso, para a obtenção de resultados mais homogêneos como indicado na Tab. 9.

Tab. 9 – Composição dos provetes com S2 submetidos ao ensaio Marshall

	Solo	% Teor ótimo de humidade	% Enzimática	Aditivo
7 dias	S2	9	0	Sem
			6,25	
			12,5	
7 dias	S2	9	0	Com
			6,25	

O cálculo dos principais parâmetros necessários, tais como altura, diâmetro e peso (anexos A.3.2; A.3.4), foram feitos com recurso aos aparelhos apropriados, como é o caso da balança e do medidor como é visível na Fig. 45.

Tendo em consideração os resultados do ensaio Marshall para o solo S1, onde concluímos a viabilidade dos resultados ao fim de 7 dias e, face ao período de investigação disponível nesta fase do trabalho, optamos por realizar os ensaios apenas aos 7 dias (anexos A.3.1; A.3.4). Deste modo, os provetes foram ensaiados numa prensa Marshall como mostra a Fig. 46, sendo obtidos os valores da máxima força e da deformação.



Fig. 45 – Provette de adobe, balança e medidor



Fig. 46 – Ensaio na prensa Marshall

Por meio dos resultados obtidos, pela análise da máxima força aplicada e da deformação obtida, é possível concluir que o solo S2 tem um melhor comportamento para uma percentagem enzimática de 6,25% juntamente com a adição do aditivo.

Tendo em consideração os resultados do ensaio Marshall para o solo S1, onde concluímos a viabilidade dos resultados ao fim de 7 dias e, face ao período de investigação disponível nesta fase do trabalho, optamos por realizar os ensaios apenas aos 7 dias, determinando a máxima força e a deformação como mostram os gráficos da Fig. 47.

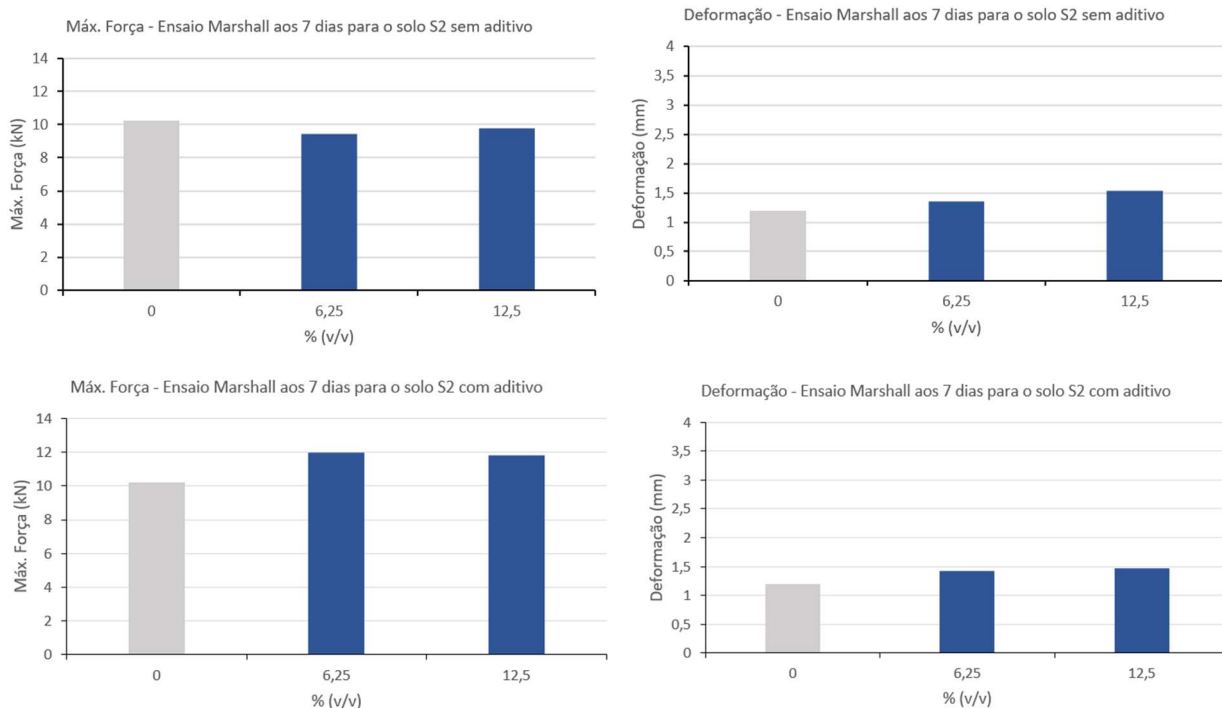


Fig. 47 – Ensaio Marshall para o solo S2

De acordo com os resultados obtidos para o solo S2, os provetes de adobe apresentam um melhor comportamento quando sujeito a uma percentagem enzimática de 6,25 e à presença de aditivo, o que corrobora o resultado obtido para o mesmo ensaio aquando da aplicação desta percentagem enzimática ao solo S1.

5

ANÁLISE DE CUSTOS

5.1. INTRODUÇÃO

O propósito deste capítulo passa por realizar uma breve análise de custos e avaliar a viabilidade económica do sistema construtivo usando blocos em adobe. Para isso vão ser considerados os custos de alvenaria relativos à edificação das paredes, pelo que os trabalhos referentes aos movimentos de terra, estaleiro, fundações, coberturas e arranjos exteriores e especialidades como é o caso de instalações de equipamentos elétricos, de gás e redes prediais de água e esgotos não serão quantificados. Complementarmente, irá ser efetuada uma comparação do custo final entre os blocos de adobe com a adição enzimática e os blocos com adição de cimento.

5.2. ESPECIFICIDADES DO BLOCO

Para este estudo foi considerado um molde com encaixe de forma a poder funcionar com juntas secas. As dimensões de bloco usado são: 30x15x10 cm³ munidos de dois orifícios simétricos que possibilitem a passagem quer de armaduras quer das componentes elétricas e hidráulicas como mostra a Fig. 48. Os orifícios possuem duas reentrâncias do tipo macho-fêmea, com uma elevação de 10 mm para, deste modo, possibilitar o aumento da regularidade e assentamento dos blocos, bem como assegurar a resistência ao corte.

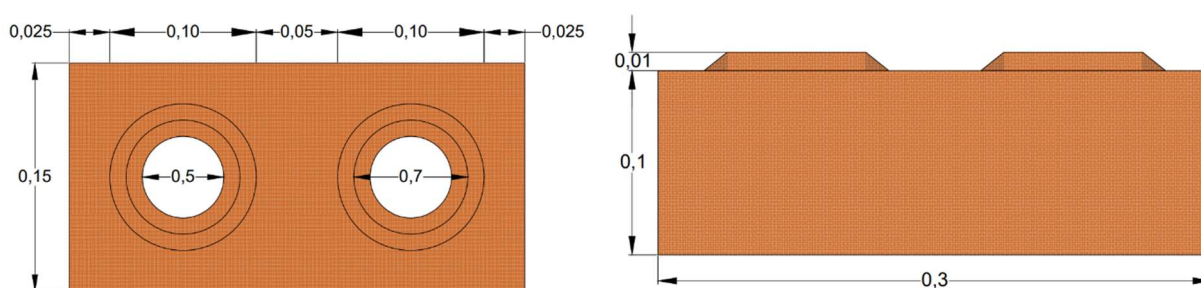


Fig.48 – Bloco utilizado

5.3. CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS

Foi realizada uma divisão dos custos em três parâmetros, sendo os mesmos referentes aos equipamentos, à mão de obra necessária e ao material utilizado. Complementarmente, foi realizada uma aplicação prática para um caso específico e feita uma comparação de custos entre o uso de blocos de adobe e blocos constituídos por cimento.

5.3.1. EQUIPAMENTO

Para a produção dos blocos recorreu-se a uma prensa automática, a um multiprocessador e a uma esteira transportadora (Fig. 49).



Fig. 49 – Equipamento utilizado na produção dos blocos

A prensa automática utiliza um sistema hidráulico que possibilita a compactação do solo, produzindo consequentemente tijolos com elevada resistência mecânica e térmica.

O multiprocessador é fulcral na produção dos blocos de Adobe pois permite a correta mistura e trituração do solo usado, garantindo deste modo uma mistura homogênea e de qualidade.

No que diz respeito ao transporte dos blocos a esteira transportadora desempenha essa função. Com efeito, a mesma é usada para o transporte dos blocos da prensa até ao local de secagem ou cura, o que agiliza o processo de produção, evitando que os tijolos sejam danificados ou quebrados durante o transporte, garantindo a qualidade da mistura e consequente otimização do processo.

Os preços dos equipamentos foram disponibilizados pela empresa ALROMA responsável pela produção e comercialização dos mesmos. Não obstante a empresa ser sediada no Brasil, os valores facultados pela mesma incluem os custos de exportação. Deste modo, encontram-se discriminados, na Tab. 10, os valores de produção, dimensões e preço associado a cada equipamento utilizado.

Tab.10 – Características dos equipamentos utilizados

Designação	Capacidade de produção	Dimensões	Preço (€)
Prensa automática	3000 blocos/dia	1,10x2,70x2,15 m	23140
	4 homens	800 kg	
Multiprocessador 400 L	400 l	1,40x5x2,50 m	14875
		750 kg	
Esteira Transportadora 6m	20	0,40x6x2,50 m	2310
		140 kg	
			Total: 40325

Por conseguinte, o custo associado aos equipamentos utilizados foi de 40325 €.

5.3.2. MÃO-DE-OBRA

Para a mão-de-obra foram considerados 4 homens (pedreiros), sendo a remuneração média de 7,69 €/h e a duração considerada de trabalhos de uma semana. Consequentemente, foi obtido o valor de 1230,4 € associado aos custos com operários como indicado na Tab .11.

Tab. 11 – Custo associado à mão-de-obra

Nº de operários	Salário médio (€/h)	Duração da obra (dias)	Total (€)
4	7,69	5	1230,4

5.3.3. MATERIAL

Para a obtenção do material a ser empregue nos blocos, foi considerado que o solo utilizado foi extraído da própria região de Aveiro. Assim, o mesmo possui as características granulométricas de S1, ao qual foi atribuído um custo nulo, pelo que apenas será contabilizado o custo da enzima a ser utilizada. O preço para a aplicação de uma enzima no solo pode variar dependendo de vários fatores, como o tipo de enzima, a frequência e duração de aplicação, a localização geográfica, entre outros fatores. São as empresas que produzem e comercializam as enzimas as responsáveis por fornecer informações detalhadas sobre o preço e o modo de aplicação. Deste modo, o preço da mesma foi obtido da continuação de trabalhos anteriores sendo o mesmo de 3,83 €/m³ e o valor da sua aplicação de 0,20 €/m³.

No que concerne ao valor dos blocos, foram tidas em consideração as dimensões mencionadas anteriormente e as características granulométricas do solo S1, especificamente o valor da baridade seca máxima de $2,09 \text{ g/cm}^3$, sendo assim possível calcular o custo unitário do bloco, estando o mesmo descrito na Tab. 12.

Tab. 12 – Custo da produção unitária do bloco de Adobe

Custo da enzima (€/m ³)	3,83
Aplicação da solução (€/m ³)	0,20
Volume do bloco (m ³)	$4,1075 \times 10^{-3}$
Baridade solo S1 (kg/m ³)	2090
Massa do bloco (kg)	8,58
Custo unitário do bloco (€)	0,0165

5.3.4. APLICAÇÃO NA EDIFICAÇÃO DE PAREDES

A solução adotada consiste numa moradia térrea com dois quartos, um WC, sala e cozinha na mesma divisão, com uma geometria em planta bastante regular, com as dimensões observadas na Fig. 50, sendo que foi considerada uma altura total média das paredes de 3,0 m. Para a determinação da quantidade de blocos a serem empregues, admitiu-se paredes contínuas (para ter em conta os desperdícios que não serão contabilizados). Foi feita uma divisão das paredes exteriores e interiores, obtendo-se a quantidade de blocos necessários para cada uma, como indicado na Tab. 13.

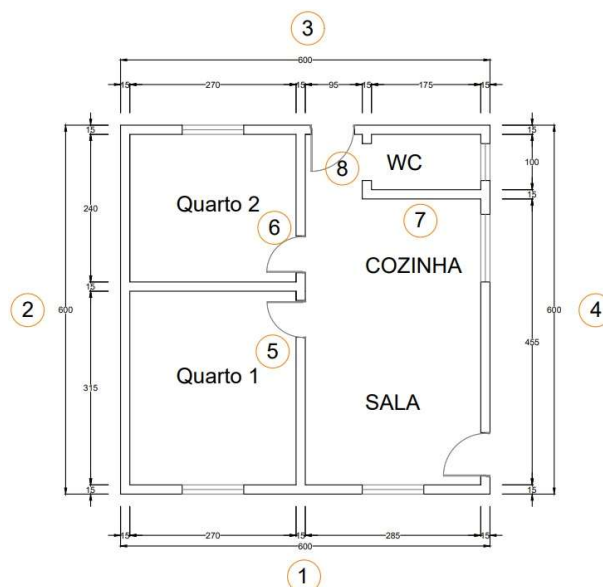


Fig. 50 – Planta do caso a analisar

Tab. 13 – Quantidade total de blocos utilizados

Parede	Quantidades de blocos
1	600
2	600
3	600
4	600
5	300
6	300
7	200
8	100
Total: 3600	

Com efeito, para a solução em estudo, foi possível determinar que são necessários produzir 3600 blocos de Adobe para a respetiva elevação das paredes. Sabendo que o custo unitário é de 0,0165 €, obtemos um custo total de 59,4 €.

Em suma, e considerando apenas os custos relativos ao equipamento, à mão-de-obra e ao material empregue, temos, para o caso em análise um encargo total de 41614,8 €.

5.3.5. COMPARAÇÃO COM BLOCOS DE CIMENTO

Nesta fase do trabalho, foi realizado um paralelismo entre os blocos de adobe e blocos de cimento, sendo feita uma comparação de custos numa situação em que são empregues os segundos na construção das paredes.

No sentido de obter resultados mais fiáveis foi considerado um bloco com as mesmas características dos blocos de adobe como demonstrado na Fig. 51.

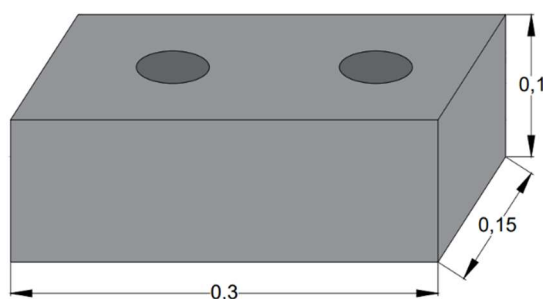


Fig. 51 – Bloco utilizando cimento

Para o cálculo do custo unitário do bloco, foi tida em conta o traço (1:3:0,5), as densidades dos materiais, bem como o valor atual de mercado do cimento e areia, estando todos os dados considerados relevantes para a obtenção do preço final enunciados na Tab. 14.

Tab. 14 – Custo da produção unitária do bloco de cimento

Densidade do cimento (kg/m ³)	1440
Custo do cimento (€/kg)	0,18
Densidade da areia grossa (kg/m ³)	1800
Custo da areia grossa (€/kg)	0,06
Volume do bloco (m ³)	4,1075x10 ⁻³
Massa do cimento (kg)	1,31
Massa de areia grossa (kg)	4,9
Custo do cimento no bloco (€)	0,23
Custo da areia grossa (€)	0,29
Custo unitário do bloco (€)	0,52

Para o caso de produzir 3600 blocos de cimento, o custo final de produção seria de 1872 €, valor substancialmente superior ao obtido aquando da produção de blocos de adobe, estabilizados com EnzyMats, onde foi conseguido um valor de 59,4 €. Esta diferença assume-se considerável, por consequência do caso onde é feita utilização do solo da própria região, uma vez que para a obtenção do custo do material foi considerado nulo, sendo apenas contabilizada a EnzyMats.

6

CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

De modo a poder dar uma resposta à indústria de construção mais sustentável, é essencial que o setor construtivo opere com o objetivo de diminuir o consumo de materiais e recursos, visando a redução dos impactos ambientais e confluindo para a sustentabilidade. Assim, a utilização de terra passível de estabilização para uso construtivo assume-se como vantajosa, possuindo importantes benefícios que a tornam uma opção viável e cada vez mais adequada para a construção de edifícios. Por se tratar de uma matéria-prima abundante, por não necessitar de mecanismos de transformação dispendiosos a nível energético, possuir características térmicas favoráveis e se tratar de uma matéria passível de ser reciclada e reutilizada, estas especificidades tornam a mesma deveras competitiva face às opções construtivas tradicionais, sendo expectável um futuro promissor para esta solução. É, todavia, fundamental uma aprovação institucional no que concerne ao uso da terra como material construtivo, bem como a devida regulamentação.

A presente dissertação permitiu a avaliação das características mecânicas de solos da região de Aveiro, a estabilização dos mesmos por meio de uma percentagem enzimática ótima e posterior avaliação da aplicabilidade da mesma como material de construção por meio de uma breve análise de custos.

No que concerne à enzima desenvolvida pela empresa MatsWay, foi possível inferir que a percentagem ótima da mesma para aplicar aos provetes de adobe é de 6,25%, sendo para essa percentagem que se verifica o melhor comportamento tanto a nível da máxima força como da deformação máxima correspondente. Os resultados obtidos foram determinados pelo ensaio de Marshall e pelo ensaio de compressão não confinada uniaxial, sendo o ensaio de Marshall o indicado para a validação dos resultados e obtenção da percentagem enzimática ótima em detrimento do ensaio UCS, consequência da maior homogeneidade de resultados. Os provetes em Adobe com uma percentagem de EnzyMats de 6,25% apresentaram um melhor comportamento, como referido anteriormente, tanto na ausência como presença de aditivo, sendo que a presença do mesmo potencializou favoravelmente os valores finais. Foi igualmente possível validar as soluções para os ensaios ao fim de 7 dias devido à uniformidade dos valores obtidos tanto para os 14 como para os 28 dias.

Por fim, a análise económica realizada, apesar de breve, permitiu inferir que o uso de blocos de Adobe estabilizados se assume como uma opção viável e rentável na construção, sendo uma alternativa mais vantajosa a nível ecológico e sustentável, preocupação bastante presente na sociedade atual.

Em conclusão, é fulcral, como mencionado anteriormente, uma revisão profunda a nível da regulamentação, no que concerne a este sistema construtivo.

6.2. PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, foi possível identificar alguns constrangimentos e limitações. Por um lado, a construção com terra é um tema que carece de revisão normativa em Portugal, pelo que, por vezes, se revelou exaustiva a tentativa de obter normas válidas para a realização dos ensaios. Por outro lado, a realização da investigação em contexto empresarial implicou o acompanhamento de um ritmo de trabalho que nem sempre foi compatível com as exigências da realização de uma dissertação em meio académico. Acrescem, ainda, as limitações em termos de partilha de informação confidencial da empresa, que terão bloqueado e/ou atrasado algumas fases do presente estudo.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após atenta análise dos resultados obtidos nesta dissertação e com a finalidade de acrescentar valor ao estudo, sugere-se para futuras pesquisas:

- Realizar ensaios UCS e Marshall em blocos bioestabilizados e avaliar as diferenças para os provetes.
- Realizar os ensaios propostos para solos com características totalmente distintas e avaliar o comportamento dos mesmos na presença de EnzyMats.
- Analisar a viabilidade económica da produção de EnzyMats e aplicação em estradas de terra e na construção de habitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Rocha, *Técnicas de Construção com Terra*. 2015.
- [2] G. Minke, “Introduction 1 Building with Earth Appendices 3 Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture Birkhäuser-Publishers for Architecture Basel · Berlin · Boston,” 2006.
- [3] F. Pacheco, T. Rute, M. G. Eires, and S. Jalali, *Construção em Terra*. 2009.
- [4] R. De and A. Botinas, “ESTUDO DO SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL STUDY OF THE SOIL AS A SUSTAINABLE BUILDING MATERIAL,” 2017.
- [5] U. Proposta, S. Reis Duarte, O. Científico, A. Pedro Rodrigues Co-Orientador, and E. Jorge Bastos, “CONSTRUIR COM A TERRA Dissertação/Projecto para obtenção do Grau de Mestre em Arquitectura,” 2013.
- [6] H. Schroeder, “Modern earth building codes, standards and normative development,” 2012.
- [7] D. J. Dos and S. Parreira, “Setembro 2007 Análise Sísmica de uma Construção em Taipa,” 2007.
- [8] G. J. Palma Dias, “A terra como material de construção,” 2013, pp. 11–16.
- [9] M. Fernandes, *Técnicas Construtivas em Terra*. 2016.
- [10] “http://craterre.org/?new_lang=en_GB,” Jan. 10, 2023.
- [11] T. Diaz Gonçalves and M. I. Gomes, “CONSTRUÇÃO DE TERRA CRUA: POTENCIALIDADES E QUESTÕES EM ABERTO,” 2012.
- [12] Walker P. and Standards Australia, “The Australian earth building handbook. Sydney (Australia): Standards Australia, 2001. HB 195.”
- [13] U. Fernando Pessoa, “Luís Manuel Rodrigues Ferreira ARQUITETURA DE TERRA Das técnicas construtivas ao desenvolvimento de competências,” 2015.
- [14] M. R. Amoroso, C. Guimaraens, D. Dias, A. Costa, and A. Tavares, “PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO BRASIL-PORTUGAL,” 2020.
- [15] D. E. Tomar, C. Manuel, and O. Brasil, “Escola Superior de Tecnologia de Tomar ESTUDO DAS CONSTRUÇÕES TRADICIONAIS EM ADOBE NA REGIÃO,” 2016.
- [16] J. Pinto, R. S. Cardoso, and S. Pereira, “Special issue ‘Earth Construction: State of the Art, Challenges and New Technologies’ View project ReCoTiP Development of Reinforced Concrete Elements and Systems with Waste Tire Powder View project,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/235955655>
- [17] DEBARRO ARQUITECTURA, “<https://debarroarquitectura.com/>,” Dec. 10, 2022.
- [18] C. Neves and O. B. Faria, *Técnicas de construção com terra*. 2011. [Online]. Available: www.redproterra.org

- [19] E. ; Soares, R. A. ; Silva, T. ; Miranda, and D. V. ; Oliveira, “DESEMPENHO MECÂNICO DE ALVENARIA DE BTC ESTABILIZADOS ATRAVÉS DA ATIVAÇÃO ALCALINA DE CINZAS VOLANTES MECHANICAL PERFORMANCE OF MASONRY MADE WITH CEB STABILISED BY ALKALI ACTIVATED FLY ASHES,” 2016.
- [20] M. Lopes and A. Fernandes, “A cultura construtiva do adobe em Portugal,” 2013.
- [21] “<https://www.diariocoimbra.pt/noticia/72813>,” Jan. 20, 2023.
- [22] “<https://www.regiaodeaveiro.pt/pages/496>,” Jan. 20, 2023.
- [23] H. Varum, “Comportamento estrutural de elementos resistentes em alvenaria de adobe,” 2006.
- [24] H. Varum, A. Costa, H. Pereira, J. Almeida, and H. Rodrigues, “CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE ADOBE,” *Mecânica Experimental*, vol. 15, pp. 23–32, 2008.
- [25] D. Silveira, H. Varum, and A. Costa, “Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: The traditional adobe constructions in Aveiro district,” *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 102, pp. 705–714, 2007, doi: 10.2495/SDP070682.
- [26] M. Francisco *et al.*, “Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios Engenharia Civil,” 2015.
- [27] C. F. Mannarino, J. A. Ferreira, and M. Gandolla, “Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia,” *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 21, no. 2, pp. 379–385, Apr. 2016, doi: 10.1590/S1413-41522016146475.
- [28] Tom. Morton, Great Britain. Department of Trade and Industry., and Communities Scotland (Agency), *Low cost earth brick construction : 2 Kirk Park, Dalguise : monitoring & evaluation : a Partners in innovation research project final report*. [Communities Scotland?], 2005.
- [29] -John Elkington and J. Hailes, “ESCOLA DE ENGENHARIA-Departamento de Engenharia Civil Mestrado em Engenharia Civil PARTE I ENQUADRAMENTO DO TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO NA REALIDADE DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. O IMPACTE AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO. CAPÍTULO 1 FUNDAMENTAÇÃO E OBJECTIVOS 1.1. Introdução,” 2004.
- [30] R. Delgado Oliveira Nunes Cravo and D. José Ângelo Guerreiro da Silva, “A Evolução do Desenvolvimento Sustentável em Portugal nos últimos 30 anos,” 2018.
- [31] M. Ângelo *et al.*, “INDICADORES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil Júri: Outubro 2010,” 2010.
- [32] M. L. (Martin L.) Parry and Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group II., *Climate change 2007 : impacts, adaptation and vulnerability : contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
- [33] P. M. Pereira and C. S. Vieira, “Resíduos de Construção e Demolição. Um Estado de Arte visando a sua Valorização em Trabalhos Geotécnicos,” 2013.
- [34] V. T. MOTTA, “Bioquímica básica,” 2003.

- [35] F. M. Junior Novaes, D. L. M de Aguiar, and M. B. Barreto Júlio C Afonso, “Atividades Experimentais Simples para o Entendimento de Conceitos QUÍMICA NOVA NA ESCOLA *Solanum tuberosum*-Uma Alternativa Versátil,” 2011.
- [36] H. Yamanaka, “Biossensores Baseados no processo de inibição enzimática paulo roberto Brasil de oliveira marques* e,” 2008.
- [37] N. M. F. Carvalho *et al.*, “USO DE EQUAÇÕES LINEARES NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MICHAELIS-MENTEN,” 2010.

ANEXOS

A1. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S1

A.1.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	7.41	1.44	0.76	0.23	2.09	10.65	3.54
6.25	7.35	1.31	2.96	0.78	2.11	9.61	3.48
12.50	7.06	1.51	0.86	0.43	2.08	10.65	3.40
25.00	6.65	1.59	1.21	0.32	2.11	10.59	3.14

A.1.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
1	7	1044,4	6,0	471,2
3		1043,9	6,0	471,2
4		1044,8	5,9	463,4
10		1038	5,9	463,4
11		1032,9	6,0	471,2
12		1039	6,0	471,2
13		1049,5	6,0	471,2
19		1043,8	6,0	471,2
20		1015,9	5,9	463,4
21		1056,1	6,0	471,2

22	1047,4	6,0	471,2
36	1056,2	6,0	471,2
37	1048,7	6,0	471,2
38	1047,9	5,9	463,4
39	1057,5	5,9	463,4

A.1.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	7.89	1.37	0.31	0.07	2.06	10.83	3.83
6.25	7.44	1.22	0.59	0.54	2.05	9.11	3.63
12.50	7.69	1.32	0.14	0.08	2.08	10.12	3.70
25.00	7.51	1.32	0.61	0.19	2.09	9.93	3.59

A.1.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
5	14	1039,9	5,9	463,4
7		1059,2	5,9	463,4
8		1008,7	6,0	471,2
14		1016,1	5,9	463,4
16		1039,1	6,0	471,2
17		1036,2	6,0	471,2
23		1043,9	6,0	471,2
24		1047,7	6,0	471,2
25		1050,8	5,9	463,4
26		1053,4	6,0	471,2

40	1055,5	6,0	471,2
41	1055,5	6,0	471,2
42	1068,1	6,1	479,2
43	1051,7	5,9	463,4

A.1.5. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 28 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	7.65	1.27	0.30	0.17	2.08	9.73	3.67
6.25	7.67	1.07	0.35	0.02	2.05	8.22	3.75
12.50	7.00	1.40	0.29	0.27	2.20	9.82	3.19
25.00	5.90	1.67	1.60	0.27	2.10	9.84	2.80

A.1.6. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 28 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
C1	28	1052,2	6,0	471,2
C2		1050,7	5,8	455,5
9		1042,8	5,9	463,4
C3		1056,7	6,0	471,2
18		1036,6	6,0	471,2
31/6,25		1053,4	6,0	471,2
32/6,25		1048,0	6,1	479,1
33/6,25		1056,7	6,1	479,1
27		1049,7	5,9	463,4

28	1039,3	5,8	455,5
29	1045,9	5,0	392,7
30	1051,2	5,9	563,4
44	1042,4	5,8	455,5
45	1059,8	6,0	471,2
46	1066,6	6,0	471,2
47	1060	6,0	471,2

A.1.7. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	6.73	1.54	1.21	0.16	2.06	4.36	3.28
6.25	8.52	1.44	0.08	0.08	2.13	5.94	4.00
12.50	7.31	1.64	1.27	0.20	2.07	4.45	3.54
25.00	5.97	1.98	0.39	0.34	2.09	3.02	2.85

A.1.8. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
A1	7	1045,0	6,0	471,2
A2		1041,0	6,0	471,2
A3		1044,0	6,0	471,2
A4		1046,0	6,0	471,2
A30*		1053,0	6,2	486,9
A31*		1048,0	6,4	502,7
A13		1043,0	6,0	471,2
A14		1030,0	5,9	463,4

A15	1042,0	6,0	471,2
A16	1041,0	6,0	471,2
A25	1048,0	6,1	479,1
A26	1034,0	6,1	479,1
A27	1034,0	6,1	479,1
A28	1028,0	5,9	463,4
A29-2	1056,0	6,3	494,8
A29-3	1060,0	6,3	494,8
A38	1047,0	6,0	471,2
A39	1048,0	6,1	479,1
A40	1064,0	6,4	502,7

A.1.9. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	5.66	1.73	1.23	0.48	2.03	3.27	2.89
6.25	8.37	1.55	0.77	0.31	2.06	5.40	4.06
12.50	6.03	1.91	0.67	0.25	2.07	3.16	2.92
25.00	5.28	2.13	0.88	0.22	2.02	2.48	2.61

A.1.10. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
O	14	1041,0	6,0	471,2
A6		1046,0	6,1	479,1

A7	1024,0	6,0	471,2
A8	1027,0	6,0	471,2
A32*	1056,0	6,2	486,9
A33*	1051,0	6,2	486,9
A34*	1050,0	6,4	502,7
A17	1022,0	6,0	471,2
A18	1054,0	6,0	471,2
A19	1024,0	6,0	471,2
A20	1030,0	6,0	471,2
A30	1052,0	6,1	479,1
A31	1048	6,2	471,2
A33	1053,0	6,0	502,7
A42	1056,0	6,4	479,1
A43	1046,0	6,1	486,9
A44	1059,0	6,2	510,5
A45	1070,0	6,5	479,1

A.1.11. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 28 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	6.28	1.31	1.35	0.11	2.02	4.81	3.11
6.25	7.23	1.41	0.56	0.10	2.02	5.12	3.57
12.50	4.39	1.50	1.23	0.00	2.05	2.93	2.14
25.00	4.76	2.32	0.76	0.16	2.01	2.05	2.36

A.1.12. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 28 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
---------	---------	------------------	--------	---------

cura				
A9	28	1038,0	6,0	471,2
A10		1054,0	6,0	471,2
A11		1032,0	6,0	471,2
A12		1029,0	6,0	471,2
A35*		1056,0	6,4	502,7
A36*		1055,0	6,5	510,5
A21		1039,0	6,1	479,1
A22		1032,0	6,2	486,9
A23		1040,0	6,1	479,1
A24		1023,0	6,0	471,2
A34		1055,0	6,5	510,5
A35		1046,0	5,9	463,4
A36		1042,0	5,9	463,4
A46		1060,0	6,4	502,7
A47		1053,0	6,2	486,9
A48		1029,0	6,1	479,1

A2. ENSAIO UCS PARA O SOLO S1

A.2.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	4.83	2.80	1.56	0.69	2.08	13.50	2.32
6.25	4.79	2.57	2.10	1.55	2.08	12.32	2.30
12.50	4.60	1.63	0.24	0.94	2.03	7.49	2.26
25.00	5.38	2.71	0.97	0.14	2.09	14.59	2.57

A.2.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
1	7	2643,6	15,1	1186,0
2		2620,9	15,2	1193,8
3		2629,7	15,1	1186,0
10		2597,9	15,1	1186,0
11		2608,8	15,1	1186,0
12		2604,7	15,0	1178,1
19		2629,7	15,3	1201,7
20		2580,9	15,1	1186,0
21		2632,6	15,3	1201,7
28		2678,3	15,4	1209,5
29		2622,0	15,0	1178,1
30		2588,5	15,0	1178,1

A.2.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	3.89	2.83	0.85	0.73	2.04	11.00	1.91
6.25	3.67	1.37	2.02	0.97	2.02	5.02	1.81
12.50	3.07	1.46	1.30	0.69	2.03	4.49	1.51
25.00	4.43	2.37	0.49	0.18	2.04	10.49	2.17

A.2.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm ³)
4	14	2693,7	16,4	1288,1
5		2683,1	15,5	1217,4
6		2601,5	14,8	1162,4
13		2610,1	15,2	1193,8
14		2606,1	15,0	1178,1
15		2528,7	14,9	1170,2
22		2556,3	15,0	1178,1
23		2642,0	15,5	1217,4
24		2591,5	15,6	1225,2
31		2647,1	15,1	1286,0
32	14	2647,2	15,1	1286,0
33		2585,1	14,8	1162,4

A.2.5. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	6.98	2.05	0.49	0.03	2.08	3.41	3.35
6.25	7.88	1.42	3.44	0.89	2.11	5.55	3.74
12.50	6.89	1.74	0.32	0.74	2.11	3.96	3.26
25.00	7.54	1.49	0.07	0.14	2.10	5.06	3.60

A.2.6. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm ³)
1	7	2648,0	15,1	1186,0
2		2628,4	15,4	1209,5
3		2662,0	15,0	1178,1
7		2657,2	15,0	1178,1
8		2649,6	15,0	1178,1
9		2620,9	15,1	1186,0
14		2641,2	14,8	1162,4
15		2643,1	15,1	1186,0
16		2654,5	15,1	1186,0
20		2654,5	15,2	1193,8
21		2646,9	15,1	1186,0
22		2636,9	15,3	1201,7

A.2.7. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 14 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	6.11	2.11	0.68	0.12	2.11	2.90	2.90
6.25	6.31	1.19	2.73	0.70	2.09	5.32	3.01
12.50	6.47	1.48	0.04	0.14	2.10	4.37	3.08
25.00	7.71	1.72	0.38	0.32	2.08	4.49	3.71

A.2.8. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 14 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm ³)
5	14	2606,1	15,0	1178,1
6		2528,7	14,9	1170,2
10		2556,3	15,0	1178,1
11		2642,0	15,0	1178,1
13		2647,1	15,2	1193,8
17		2647,2	15,0	1178,1
18		2585,1	15,1	1186,0
19		2615,1	15,1	1186,0
23		2620,6	15,1	1186,0
24		2598,6	15,1	1186,0
25		2525,3	15,2	1193,8

A3. ENSAIO MARSHALL PARA O SOLO S2

A.3.1. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	10.22	1.20	1.32	20.55	0.21	8.52	49.08
6.25	9.45	1.35	1.40	20.55	0.21	7.02	44.10
12.50	9.77	1.53	2.68	17.00	0.21	6.37	45.90

A.3.2. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS SEM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
1S	7	1065,3	6,0	492,0
2S		1063,2	6,0	492,0
3S		1077	6,0	492,0
4S		1055,8	5,8	475,6
5S		1056,4	5,8	475,6
6S		1061,2	5,8	475,6
7S		1056,2	5,8	475,6
8S		1057,2	5,8	475,6
9S		1054,1	5,8	475,6

A.3.3. FORÇA, DEFORMAÇÃO, DENSIDADE AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Concentrações (%)	Força (kN)	Def (mm)	Des.Pad (kN)	Des.Pad (mm)	Densidade	F/Def	F/D
0.00	10.22	1.20	1.32	20.55	0.21	8.52	49.08

6.25	11.98	1.63	16.44	4.71	0.21	7.33	56.16
12.50	11.83	1.47	14.38	24.49	0.21	8.07	56.97

A.3.4. MASSA, ALTURA, VOLUME AOS 7 DIAS COM ADITIVO

Provete	Dias de cura	Massa húmido (g)	h (cm)	V (cm3)
1C	7	1065,3	6,0	492,0
2C		1063,2	6,0	492,0
3C		1077	6,0	492,0
4C		1058,2	5,8	475,6
5C		1062,5	5,8	475,6
6C		1053	5,8	475,6
7C		1053	5,8	475,6
8C		1062,7	5,8	475,6
9C		1059,8	5,8	475,6