

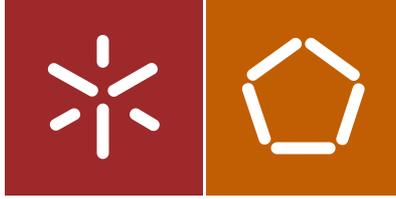


Gilberto Carlos Salazar Machado

Caracterização experimental das propriedades físicas e mecânicas e da durabilidade de blocos de terra comprimida

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Gilberto Carlos Salazar Machado

Caracterização experimental das
propriedades físicas e mecânicas e da
durabilidade de blocos de terra comprimida

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professor Doutor Ricardo Mateus
Doutora Elisabete Teixeira
Mestre Jorge Fernandes

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial
CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um agradecimento especial à minha mãe, pelo apoio incansável e por sempre acreditar em mim, assim como pelo ensinamento do valor da resiliência e perseverança. Sem a minha mãe, nada disto era possível. À minha namorada, Mafalda, pela paciência, pelo carinho e pelas palavras de motivação que sempre me incitou. À minha irmã, pelo espírito otimista e ao Zé pelo apoio prestado.

Depois, quero agradecer ao meu orientador Dr. Ricardo Mateus pela disponibilidade, orientação e conselhos dados. Ao mestre Jorge Fernandes agradeço a disponibilidade. Um agradecimento especial, à Dra. Elisabete Teixeira pela constante disponibilidade, apoio e consideração, pelo rigor que sempre me exigiu ao longo do desenvolvimento deste trabalho, e, por fim, agradeço a amizade e a partilha de conhecimentos.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Civil pelo acompanhamento prestado ao longo da campanha experimental, pelo companheirismo, amizade e boa disposição que sempre demonstraram, António Matos, José Gonçalves, Eng. Carlos Jesus, César Gonçalves, Eng. Marco Jorge, obrigado.

Gostaria de agradecer o apoio concedido pelos fundos do FEDER através do Programa Operacional de Competividade e Internacionalização (POCI) e pelos fundos nacionais através da FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto com a seguinte referência POCI-01-0145-FEDER-029328, que foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo. Também quero agradecer à empresa “Betão e Taipa” pela cedência dos blocos de terra comprimida e por apoiar este trabalho de pesquisa.

E por fim, mas não menos importante, aos meus grandes amigos, pela amizade, pelo apoio e pelas boas “tainadas” vividas.

*Para o meu pai,
a minha saudade diária...*

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA

RESUMO

A terra tem vindo a ser usada há mais de onze milénios e continua ainda hoje a ser o material de construção mais difundido em todo o mundo. Contudo, com o aparecimento de outros materiais de construção (betão, aço e tijolo cerâmico), a construção em terra caiu em desuso. No entanto, a terra, como material de construção, apresenta diversas vantagens no que se refere ao seu custo, à sua capacidade de isolamento térmico e acústico, à sua baixa energia incorporada (associada à fases de extração, transformação, transporte e produção) e a produção de resíduos é praticamente insignificante. Dada a grande preocupação existente na atualidade sobre a sustentabilidade, a construção em terra assume-se como sendo uma alternativa para o setor de construção. Existem diversas técnicas de construção em terra, sendo os blocos de terra comprimida (BTC) a técnica construtiva mais aceite pela sociedade, pois consegue-se um maior controlo de qualidade durante o seu processo de construção. Assim sendo, a presente dissertação tem como principal objetivo caracterizar o comportamento de blocos de terra comprimida, que se encontram atualmente no mercado, sendo utilizados para a execução de alvenaria de compartimentação. Para tal, foi caracterizado o solo utilizado no fabrico dos BTC (análise granulométrica, ensaio de compactação: Proctor, limites de consistência, determinação do teor de finos através do ensaio de azul de metileno e equivalente de areia) e foram caracterizadas as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos BTC (resistência à compressão, resistividade elétrica, velocidade de propagação dos ultrassons, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e erosão à chuva).

Após análise dos resultados, obtidos na campanha experimental, conclui-se que o solo caracterizado é um solo com características adequadas para ser utilizado no fabrico dos BTC. Os BTC caracterizados apresentam uma boa resistência à compressão, podendo ser usados com função estrutural. Apresentam, no entanto, grande sensibilidade à água, já era de esperar pois o fabricante recomenda que os mesmos não sejam aplicados em elementos expostos à chuva sem a devida proteção.

PALAVRAS-CHAVE: Blocos de terra comprimida; Construção em terra; Propriedades físicas e mecânicas; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The earth has been used as a building material for over than eleven thousand years and is still today the most widespread building material in the world. However, with the development of other building materials (e.g. concrete, steel and ceramic brick), the use of earth for construction has fallen into disuse. However, earth as a building material has several advantages with regard to its cost, its thermal and acoustic insulation characteristics, the insignificant amount of waste produced in the construction processes, its low embodied energy (energy related to the following life cycle stages: extraction, transformation, transportation and production). Additionally, given the current high demand for sustainability, earth construction is assumed to be an alternative to the construction sector. There are several techniques for earth construction like the compressed earth blocks (CEB). CEB is one of the most society's accepted earth construction technique, since it allows for a better quality control during the construction process.

Therefore, the present dissertation aims to characterize the behaviour of a CEB which is now already used in the market, being used for the construction of partitioning masonry. To this end, the soil used in the CEB production was characterised, including: particle size distribution, Proctor compaction test, consistency limits, determination of fines content by a methylene blue test and sand equivalent. Additionally, the CEB mechanical, physical and durability properties were also characterised, including: compressive strength, electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity, water absorption by immersion and capillary water and rain erosion.

After analysing the results obtained in the experimental campaign, it is concluded that the soil has suitable characteristics to be used in the production of CEB. The characterized CEB exhibit good compressive strength and can be used both as a non-loadbearing and a loadbearing wall, and mainly in a partition wall. Nevertheless, CEBs have low resistance to water, what was expected since as the recommendation of the manufacture they can only be used in an external element if implementing an adequate water protection measure.

KEYWORDS: Earth compressed blocks; Earth construction; Physical and chemical properties; Sustainability.

Índice

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA	1
1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO EM TERRA	4
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM TERRA.....	4
2.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO.....	4
2.1.2 REGULAMENTAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM TERRA.....	8
2.1.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DA CONSTRUÇÃO EM TERRA	10
2.1.3.1 <i>Humidade Relativa</i>	10
2.1.3.2 <i>Comportamento térmico</i>	11
2.1.3.3 <i>Isolamento Acústico</i>	12
2.1.3.4 <i>Ação sísmica</i>	13
2.1.4 VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO EM TERRA	14
2.1.5 DESVANTAGENS.....	17
2.2 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO	18
2.2.1 ENSAIOS DE CAMPO	18
2.2.2 ENSAIOS LABORATORIAIS	20
2.3 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	22
2.3.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA.....	22
2.3.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICA	23
2.3.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA.....	23
2.4 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO EM TERRA.....	24
2.4.1 TAIPA.....	25
2.4.2 ADOBE.....	28
2.4.3 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	35
3.1.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DO SOLO.....	36
3.1.1.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR VIA SECA.....	36
3.1.1.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR VIA HÚMIDA	37
3.1.1.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	39
3.1.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO: PROCTOR	41
3.1.2.1 COMPACTAÇÃO LEVE EM MOLDE PEQUENO.....	41
3.1.2.2 COMPACTAÇÃO PESADA EM MOLDE PEQUENO.....	44

3.1.3	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	45
3.1.3.1	LIMITE DE LIQUIDEZ.....	45
3.1.3.2	LIMITE DE PLASTICIDADE.....	47
3.1.4	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FINOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE AZUL DE METILENO	48
3.1.5	EQUIVALENTE DE AREIA	50
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)	53
3.2.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE POR SECAGEM AO AR	53
3.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	54
3.2.3	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	55
3.2.4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS	57
3.2.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	59
3.2.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	61
3.2.7	ESTUDO DA DURABILIDADE ATRAVÉS DO ENSAIO DE EROSIÃO À CHUVA	63
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....		66
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	66
4.1.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO.....	66
4.1.1.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR VIA SECA	66
4.1.1.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR VIA HÚMIDA	68
4.1.1.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DETERMINADA POR ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	69
4.1.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO: PROCTOR	70
4.1.3	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	72
4.1.3.1	LIMITE DE LIQUIDEZ.....	72
4.1.1.1	LIMITE DE PLASTICIDADE.....	73
4.1.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FINOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE AZUL DE METILENO	76
4.1.3	EQUIVALENTE DE AREIA	77
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)	78
4.2.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE POR SECAGEM AO AR	78
4.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	79
4.2.3	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	81
4.2.4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS	82
4.2.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	84
4.2.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	89
4.2.7	ESTUDO DA DURABILIDADE ATRAVÉS DO ENSAIO DE EROSIÃO À CHUVA	93
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS		104
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	104
5.2	PERSPETIVAS FUTURAS	105

REFERÊNCIAS.....	106
-------------------------	------------

Lista de Figuras

FIGURA 1: MAPA-MUNDO: DENSIDADE DE CONSTRUÇÃO EM TERRA.....	4
FIGURA 2: MONUMENTOS E CIDADES CONSTRUÍDAS EM TERRA.....	6
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS TÉCNICAS CONSTRUTIVAS.....	7
FIGURA 4: MODELO ESTRUTURAL CORRESPONDENTE À QUINTA MEDIDA DE REFORÇO.....	14
FIGURA 5: CARBONO INCORPORADO EM DIFERENTES MATERIAIS UTILIZADOS EM ALVENARIA.....	15
FIGURA 6: DIAGRAMA ESTABELECIDO PELO GRUPO CRATERRE.....	24
FIGURA 7: LEGENDA DO DIAGRAMA ESTABELECIDO PELO GRUPO CRATERRE.....	25
FIGURA 8: CONSTRUÇÃO EM TAIPA TRADICIONAL, MUMEMO, MOÇAMBIQUE.....	25
FIGURA 9: TAIPAL TRADICIONAL.....	26
FIGURA 10: CONSTRUÇÃO DE UMA PAREDE EM TAIPA TRADICIONAL.....	26
FIGURA 11: COMPACTAÇÃO MANUAL.....	27
FIGURA 12: TAIPA MECANIZADA: A) CONSTRUÇÃO EM TAIPA COM COFRAGENS METÁLICAS, B) COMPACTADOR PNEUMÁTICO.....	28
FIGURA 13: FABRICO DO ADOBE: A) DESMOLDAGEM DO MOLDE, B) SECAR AO AR LIVRE.....	29
FIGURA 14: A) ALVENARIA DE ADOBE, B) DIVERSOS TIPOS DE MOLDES.....	29
FIGURA 15: PRODUÇÃO DE ADOBE MECANIZADO.....	30
FIGURA 16: A) EXECUÇÃO ADOBE MOLDADO <i>IN-SITU</i> , B) EDIFÍCIO EM ADOBE MOLDADO <i>IN-SITU</i>	30
FIGURA 17: BTC ENCAIXE MACHO FÊMEA.....	32
FIGURA 18: BTC COM PERFURAÇÕES: A) REFORÇO DA ALVENARIA, B) ALVENARIA DE BTC COM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS.....	32
FIGURA 19: EXECUÇÃO DE BTC COM A PRENSA CINVA-RAM: A) ENCHIMENTO DO MOLDE COM TERRA, B) CONFINAMENTO DA MISTURA, C) ELEVAÇÃO DO BTC, D) RETIRADA DO BTC.....	33
FIGURA 20: PRENSAS HIDRÁULICAS MOTORIZADAS PARA FABRICO DE BTC: A) FIXA, B) MÓVEL.....	34
FIGURA 21: DESTORROAMENTO DO SOLO.....	35
FIGURA 22: ESQUARTELAMENTO DO SOLO.....	36
FIGURA 23: REALIZAÇÃO DO ENSAIO ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA SECA.....	37
FIGURA 24: SOLO RETIDO E PASSADO NO PENEIRO 10 (2 MM).....	37
FIGURA 25: REALIZAÇÃO DO ENSAIO ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA HÚMIDA.....	38
FIGURA 26: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	40
FIGURA 27: FINALIZAÇÃO DO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	41
FIGURA 28: MISTURA DE ÁGUA COM O SOLO.....	42
FIGURA 29: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO LEVE EM MOLDE PEQUENO.....	43
FIGURA 30: ETAPAS QUE DIFERENCIAM COMPACTAÇÃO PESADA DA COMPACTAÇÃO LEVE.....	44
FIGURA 31: AMOSTRA NO ALMOFARIZ.....	45
FIGURA 32: SULCO ABERTO NA CONCHA DE CASAGRANDE.....	46
FIGURA 33: AMOSTRA DO ENSAIO DA CONCHA DE CASAGRANDE.....	47
FIGURA 34: REALIZAÇÃO DO ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE.....	48

FIGURA 35: ROTURA DO FILAMENTO.....	48
FIGURA 36: AGITAR A MISTURA.....	49
FIGURA 37: REALIZAÇÃO DO ENSAIO AZUL DE METILENO	49
FIGURA 38: CINCO AURÉOLAS CONSECUTIVAS.....	50
FIGURA 39: MISTURAR A AMOSTRA COM A SOLUÇÃO.....	50
FIGURA 40: REPOUSO DA MISTURA.....	51
FIGURA 41: AGITAR A MISTURA COM AUXÍLIO DE UMA MÁQUINA MANUAL.....	51
FIGURA 42: FINALIZAÇÃO DO ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA.....	52
FIGURA 43: FINALIZAÇÃO DO ENSAIO EQUIVALENTE DE AREIA.....	52
FIGURA 44: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE HUMIDADE POR SECAGEM DO AR	54
FIGURA 45: EQUIPAMENTOS E PROVETES PARA ELABORAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	54
FIGURA 46: PÓRTICO DO ENSAIO Á COMPRESSÃO	55
FIGURA 47: EQUIPAMENTO “RESIPOD PROCED”	56
FIGURA 48: CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	56
FIGURA 49: ELÉTODOS NAS DIFERENTES FACES	57
FIGURA 50: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS (A) EQUIPAMENTO “PROCER”, B) CALIBRAÇÃO, C) MÉTODO DIRETO, D) MÉTODO INDIRETO)	58
FIGURA 51: FASE INICIAL DO ENSAIO DE IMERSÃO	59
FIGURA 52: ADICIONAR ÁGUA AO RECIPIENTE.....	60
FIGURA 53: ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, SENDO POSSÍVEL CONSTATAR A PERDA DE MASSA DOS BLOCOS POR DESAGREGAÇÃO DURANTE O PROCESSO DE IMERSÃO.....	61
FIGURA 54: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	62
FIGURA 55: SIMULADOR DE CHUVAS PARA TESTE DE DEGRADAÇÃO [MM]	64
FIGURA 56: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE EROSIÃO À CHUVA.....	65
FIGURA 57: DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DOS TAMANHOS DE PARTÍCULA DO SOLO DETERMINADA POR ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA SECA.....	67
FIGURA 58: FOTO DO RESULTADO DO ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA SECA	67
FIGURA 59: DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DOS TAMANHOS DE PARTÍCULAS DO SOLO, DETERMINADA POR ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA HÚMIDA	68
FIGURA 60 DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DOS TAMANHOS DE PARTÍCULA DO SOLO DETERMINADA POR ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO	69
FIGURA 61: ENSAIO DE PROCTOR	70
FIGURA 62: DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ	73
FIGURA 63: TEOR DE HUMIDADE DOS BLOCOS POR SECAGEM AO AR.....	79
FIGURA 64: ENSAIO À COMPRESSÃO: ROTURA DO PROVETE	80
FIGURA 65 : ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: PROVETE 1	86
FIGURA 66: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: PROVETE 2	86
FIGURA 67: RESTANTES FOTOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: PROVETE 2.....	87

FIGURA 68: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: PROVETE 3	87
FIGURA 69: PROVETES DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E PERDA DE MASSA.....	88
FIGURA 70: ENSAIO DE ASCENSÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	90
FIGURA 71: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	91
FIGURA 72: DECLIVE DO TROÇO RETO DAS CURVAS DE ABSORÇÃO (Cb).....	91
FIGURA 73: ESTADO DOS BLOCOS APÓS O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	92
FIGURA 74: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 1 FACE 1.....	94
FIGURA 75: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 1 FACE 2.....	94
FIGURA 76: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 1 FACE 3.....	94
FIGURA 77: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 1 FACE 4.....	95
FIGURA 78: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 2 FACE 1.....	95
FIGURA 79: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 2 FACE 2.....	95
FIGURA 80: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 2 FACE 3.....	96
FIGURA 81: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 2 FACE 4.....	96
FIGURA 82: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 3 FACE 1.....	96
FIGURA 83: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 3 FACE 2.....	97
FIGURA 84: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 3 FACE 3.....	97
FIGURA 85: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 3 FACE 4.....	97
FIGURA 86: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 4 FACE 1.....	98
FIGURA 87: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 4 FACE 2.....	98
FIGURA 88: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 4 FACE 3.....	98
FIGURA 89: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 4 FACE 4.....	99
FIGURA 90: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 5 FACE 1.....	99
FIGURA 91: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 5 FACE 2.....	99
FIGURA 92: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 5 FACE 3.....	100
FIGURA 93: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 5 FACE 4.....	100
FIGURA 94: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 6 FACE 1.....	100
FIGURA 95: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 6 FACE 2.....	101
FIGURA 96: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 6 FACE 3.....	101
FIGURA 97: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 6 FACE 4.....	101
FIGURA 98: ENSAIO DE EROSÃO: PROVETE 7.....	102

Lista de Tabelas

TABELA 1: NORMAS E REGULAMENTOS E O SEU CONTEÚDO	9
TABELA 2: CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA VARIANTES DA CONSTRUÇÃO EM TERRA	12
TABELA 3: ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORO	12
TABELA 4: ENERGIA NO TIPO DE TRANSPORTE	16
TABELA 5: TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	22
TABELA 6: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA ADEQUADA PARA BTC	31
TABELA 7: PRODUTIVIDADE DAS PRENSAS.....	34
TABELA 8: RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA SECA	66
TABELA 9: RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR VIA HÚMIDA.....	68
TABELA 10: RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA COM SEDIMENTAÇÃO.....	70
TABELA 11: RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE PROCTOR.....	71
TABELA 12: MASSA VOLÚMICA SECA APÓS COMPACTAÇÃO	71
TABELA 13: RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ	72
TABELA 14: LIMITE DE LIQUIDEZ PARA SOLOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO EM TERRA	73
TABELA 15: RESULTADOS DO ENSAIO DO LIMITE DE PLASTICIDADE.....	74
TABELA 16: LIMITE DE PLASTICIDADE PARA SOLOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO EM TERRA	74
TABELA 17: ÍNDICE DE PLASTICIDADE PARA SOLOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO EM TERRA	75
TABELA 18: CLASSIFICAÇÃO DA PLASTICIDADE DO SOLO	75
TABELA 19: ÍNDICE DE PLASTICIDADE	75
TABELA 20: RESULTADOS DO ENSAIO DE AZUL DE METILENO	76
TABELA 21: PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO USANDO O VALOR DE AZUL DE METILENO	76
TABELA 22: RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO EQUIVALENTE DE AREIA	77
TABELA 23: CLASSIFICAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DO EQUIVALENTE DE AREIA.....	78
TABELA 24: TEOR DE HUMIDADE AO FIM DE 18 DIAS	79
TABELA 25: RESULTADOS DO ENSAIO À COMPRESSÃO.....	80
TABELA 26: LIMITE ESPECIFICADOS PARA BTC NÃO ESTRUTURAL.....	80
TABELA 27: RESULTADOS DO ENSAIO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	82
TABELA 28: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ULTRASSONS	83
TABELA 29: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ULTRASSONS POR MÉTODO DIRETO	83
TABELA 30: RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO MODIFICADO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	84
TABELA 31: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	85
TABELA 32: MASSA PERDIDA DURANTE O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E PERDA DE MASSA	88
TABELA 33: ALTURA E TEMPO DA ASCENSÃO DA ÁGUA POR CAPILARIDADE	89
TABELA 34: MASSA PERDIDA: ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	92
TABELA 35: CLASSIFICAÇÃO DOS BTC SEGUNDO A PROFUNDIDADE	93
TABELA 36: ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO DOS 7 PROVETES	94

Lista de Símbolos

cm	- Centímetro
cm ³	- Centímetro cúbico
dB	- Decibel
h	- Hora
MPa	- Megapascal
Mt	- Megatonelada
MJ	- Megajoule
m	- Metro
m ²	- Metro quadrado
m ³	- Metro cúbico
mm	- Milímetro
min	- Minuto
km	- Quilometro
kN	- Quilonewton
kPa	- Quilopascal
s	- Segundo

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	- Antes de Cristo
ASTM	- American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)
BTC	- Bloco de terra comprimida
CINVA	- International American Housing Centre (Centro Internacional da Habitação Americana)
CINVA-RAM	- Prensa manual de blocos de terra
Coef.	- Coeficiente
CO ₂	- Dióxido de carbono
CRATERRE	- Centro Internacional de Arquitetura em Terra
d.C.	- Depois de Cristo
Hr	- Humidade relativa
IP	- Índice de plasticidade
<i>in situ</i>	- No lugar/ local
LL	- Limite de liquidez
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	- Limite de plasticidade
LVDT	- Transdutor para medição de deslocamento linear
n ^o	- Número
R/C	- Rés de chão
Ton	- Tonelada

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A terra é o material de construção mais antigo do mundo [1–3], tendo sido utilizada por todas as culturas antigas desde há mais de 11.000 anos [4]. Construir em terra surgiu da necessidade do homem em se proteger do meio ambiente. Estima-se que aproximadamente 30% da população mundial vive em casas feitas em terra, representando mais de dois mil milhões de pessoas em 150 países [4–6]. Com o desenvolvimento tecnológico esta prática caiu em desuso, dando lugar às soluções correntes como o betão, aço e o tijolo cerâmico. Em resultado, devido à grande energia incorporada destes materiais, o setor da construção gera a nível global cerca de 40% de gases de efeito de estufa [7]. A nível Europeu, representa 25% de toda a produção industrial, sendo o maior exportador, com 52% de participação de mercado [8]. Sendo necessário promover cada vez mais uma construção sustentável, conjugando a tradição com o avanço tecnológico, de modo a racionalizar o consumo de energia, através de implantação de materiais sustentáveis, de origem natural e local (construção vernácula), com baixo valor de energia incorporada, reutilizáveis e/ou recicláveis. Volta a crescer o interesse em torno da terra como material de construção, devido as suas inúmeras potencialidades, tais como: é um recurso natural e inesgotável, processo de construção simples, baixa energia incorporada (extração, transformação, transporte e produção), a produção de resíduos é praticamente insignificante, proporciona um bom isolamento térmico e acústico, autorregula a humidade relativa interior, é um material não tóxico e têm uma elevada resistência ao fogo (demonstrado em 2.1.4) Sendo o principal obstáculo a sua suscetibilidade à água.

1.2 Objetivos e Metodologia

O setor de construção é um dos setores económicos mais ativos de toda a Europa [8,9]. Sendo o principal responsável por emissões de gases de efeito de estufa e pelo consumo de grandes quantidades de matérias-primas, recursos energéticos não renováveis e produção excessiva de resíduos. Pelos motivos expostos, é imprescindível encontrar uma solução altamente sustentável, comparativamente com outros materiais de construção

correntes. Assim, esta dissertação, caracteriza uma técnica construtiva que contribui para mitigar os efeitos nefastos produzidos pelo setor de construção e consequentemente promove um desenvolvimento mais sustentável. O presente trabalho tem como principal objetivo realizar a caracterização das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos blocos de terra comprimida.

Numa primeira fase deste trabalho efetuou-se uma recolha e análise bibliográfica, com o intuito de se perceber os trabalhos mais importantes já realizados no domínio do estudo da terra como material de construção.

Numa segunda fase, de modo a fazer a caracterização completa dos BTC, realizou-se a caracterização do solo que foi utilizado para a sua produção. Após análise deste, procedeu-se à caracterização dos próprios BTC.

Numa terceira fase, a fim de se poder comparar e avaliar o comportamento dos BTC, efetuou-se uma pesquisa bibliográfica complementar focada na campanha experimental.

Por fim, analisaram-se os resultados obtidos ao longo da campanha experimental, com o objetivo de verificar a viabilidade dos blocos e, dentro das conclusões retiradas, se necessário, sugerir medidas de melhorias a aplicar nos BTC que se encontram atualmente no mercado

1.3 Descrição da Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Seguidamente, será descrito o conteúdo presente em cada um deles.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema, descreve as motivações e objetivos pretendidos, bem como a descrição da organização da dissertação.

No segundo capítulo encontra-se o estado de arte do presente tema, que consistiu numa pesquisa bibliográfica sobre a construção em terra, onde são abordados diversos temas, tais como, enquadramento histórico, regulamentação existente, propriedades e características, vantagens e desvantagens, testes de caracterização, tipos de estabilização, principais técnicas de construção em terra.

No terceiro capítulo apresenta-se a descrição e ilustração dos procedimentos de ensaio e dos respectivos equipamentos utilizados em toda a campanha experimental, que consistiu na caracterização do solo utilizado na produção dos blocos de terra comprimida e na caracterização dos próprios BTC.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos em toda a campanha experimental, e consequente análise e discussão dos mesmos.

O quinto capítulo contém as principais conclusões do estudo. São também apresentadas algumas sugestões para investigações futuras, com o intuito de obter melhor conhecimento sobre esta temática.

Por fim, compilaram-se as referências bibliográficas utilizadas ao longo da elaboração da presente dissertação.

Capítulo 2 – Construção em Terra

2.1 Contextualização da construção em terra

Neste capítulo pretende-se fazer o devido enquadramento dos objetivos da dissertação, através da análise do enquadramento histórico e científico da terra como material de construção, das suas vantagens e limitações e do seu enquadramento legal, com o intuito de se estudar qual o posicionamento social, económico e técnico, da terra face à restante construção contemporânea.

2.1.1 Enquadramento histórico

A terra como material de construção têm sido desde sempre, o material mais utilizado, tanto em construções de habitações, como também em edifícios representativos e monumentos [10]. Estima-se que 30% da população mundial vive em casas feitas em terra (Figura 1), onde mais de metade dessa população se encontram em países em desenvolvimento [4–6]. Cerca de 10% dos edifícios incluídos nos locais de Património Mundial da UNESCO são construídos em terra [1]. A sua sobrevivência secular deve-se à abundância da matéria-prima, à facilidade do acesso, pois usualmente é um material local, e ser uma técnica construtiva simples, permitindo que a própria população construa a sua própria casa.



Figura 1: Mapa-mundo: densidade de construção em terra [11]

Vários autores especulam sobre a data que o homem começou a utilizar a terra como material de construção. O Grupo CRAterre (Centro Internacional de Arquitetura em terra)[4] refere que terra tenha sido utilizada como material de construção por todas as culturas antigas desde há mais de 11.000 anos.

Uma das técnicas de construção em terra mais primitiva e empregues até hoje é a construção em adobe, casas feitas com tijolos de adobe, construídas entre 8000 e 6000 a.C.. Fundações de taipa com cerca de 5000 a.C. foram também descobertas na Assíria [5].

Torgal *et al.* [11] afirmam que a construção em terra tenha tido início juntamente com o início das primeiras sociedades agrícolas num período compreendido entre 12000 a 7000 a.C.. Existem diversos monumentos e cidades construídas em terra que persistem até aos dias de hoje, como por exemplo (Figura 2) [5,11]:

- (a) As Abóbadas no templo de Ramsés em Gourná, Egipto, construídos em adobe há mais de 3200 anos;
- (b) A cidade de Shibam, Lémén, que teve origem no século III, embora os edifícios que persistiram até aos nossos dias sejam a maioria do século XVI, são construídos com paredes exteriores em adobe, com a particularidade de a espessura estreitar gradualmente nos andares superiores, de modo, a aligeirar o seu peso e melhorar a estabilidade;
- (c) A grande Muralha da China, com cerca de 4000 anos, que contém diversos troços bastantes extensos construídos em taipa, onde apenas posteriormente foram revestidos com alvenaria de pedra;
- (d) Templo de Horyuji, Japão, que possui alvenaria em taipa construídas há 1300 anos;

Na Península Ibérica, a construção em terra começou a ser utilizada por influência de diversos povos em anos distintos, como os Fenícios (1200 a.C. - 539 a.C.), Cartagineses (700 a.C. - 146 a.C.), Romanos (27 a.C. – 476 d.C.), Árabes (711 – 1492). Entre esses povos, os Árabes foram os que tiveram uma maior influência, sendo os que mais divulgaram esse tipo de construção. O Castelo de Paderne (Figura 2-(e)) e de Silves (Figura 2-(f)), são alguns exemplos da arquitetura islâmica em taipa em Portugal [11].



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2: Monumentos e cidades construídas em terra

Em Portugal, a construção em terra data de há várias centenas de anos [11]. A sul de Portugal, nomeadamente no Alentejo, Ribatejo e Algarve, aproximadamente até aos anos 50, a taipa era a técnica construtiva mais utilizada (Figura 3-(a)) [12]. No centro de Portugal, sobretudo no litoral, é onde se encontra mais confinada a técnica de construção em adobe (Figura 3-(b))[13]. Relativamente ao norte do país, a construção em terra é quase inexistente, o edifício tradicional é constituído por alvenaria de granito, cuja construção foi apoiada pela grande disponibilidade desta pedra [11].

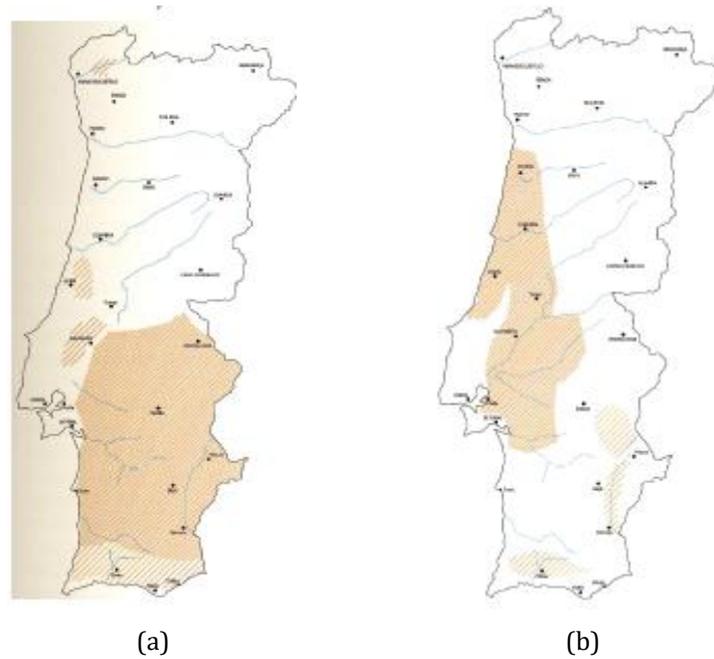


Figura 3: Distribuição geográfica das técnicas construtivas [14]

Durante o século XX, tanto em Portugal como em outros países desenvolvidos a prática de construção em terra caiu em desuso, devido ao desenvolvimento tecnológico e ao uso extensivo de materiais de construção como o betão e o aço [11,15,16], que nessa época eram considerados melhores soluções. Contudo, recentemente, com os problemas associados a uma crise energética, que conduziram a um aumento do preço dos combustíveis e, conseqüentemente, da energia para a produção dos materiais de construção e para a climatização dos edifícios, fez com que a construção em terra voltasse a ter uma certa importância. Como a construção em terra apresentava ser a mais eficiente comparativamente com as outras soluções modernas, que estavam a ser amplamente utilizadas, deu-se início na Europa a alguns movimentos e associações, de modo a valorizar mais a construção vernacular dos diferentes países, nomeadamente a construção em terra [16].

A terra como material de construção oferece benefícios económicos e ambientais, especialmente em países em desenvolvimento, onde os custos dos materiais superam a mão de obra, onde certos materiais de construção e tecnologias podem não estar disponíveis e também o acesso a certas áreas pode estar restrito, o que deriva a um custo elevado do transporte. Devido à facilidade e simplicidade de trabalhar com este material, pode ser empregue uma equipa de trabalho local não especializada, fornecendo

oportunidades de trabalho na comunidade, eliminando o custo de acomodação e custo de transporte [17].

2.1.2 Regulamentação da construção em terra

Devido à grande preocupação pelo desenvolvimento sustentável, têm-se notado um crescente interesse na terra como material de construção. Esta nova consciência deu origem a um crescimento no número de normas e regulamentações, ainda que comparativamente com outros matérias de construção o número seja muito pequeno [18].

Há já algumas décadas que o Reino Unido, a Alemanha e a França, alguns exemplos de países a nível Europeu, começaram a encarar a construção em terra como uma alternativa à construção corrente. Em países como os Estados Unidos, Brasil e Austrália tem-se notado um crescimento bastante significativo na utilização deste tipo de construção [11]. Todos os países referidos anteriormente, têm investido em formações vocacionais e também em cursos que conferem o título de especialistas.

Já Portugal, infelizmente, não têm acompanhado os movimentos em torno da construção em terra de forma similar aos outros países, especialmente se considerarmos as condições climáticas favoráveis e também por fazer parte do nosso património edificado. Portugal deveria andar a par de toda a Europa, quanto às normas e regulamentações da construção em terra. Assim, aos projetistas portugueses, não resta outra alternativa, senão utilizar uma estrutura sismo resistente e reservar a compartimentação para alvenaria em terra [11]. Estes condicionamentos, devido à falta de normas e regulamentações, faz com que se construa pouco com este tipo de material, sendo que as construções de edifícios de terra em Portugal são feitas com base na experiência adquirida e transmitida entre gerações. Apesar da falta de regulamentação, tem ocorrido um interesse manifesto na construção em terra em Portugal, no mundo académico e científico, no crescente número de teses produzidas na comunidade académica, nas conferências e cursos de formação [11,19–21].

Cid *et al.* [22] analisaram 55 normas e regulamentos de diferentes países (Tabela 1). Tendo verificado que 79% destas centram o seu conteúdo numa única técnica construtiva, seja adobe, BTC ou taipa. Os autores retiraram várias conclusões, nomeadamente que o

país que tem as normas mais completas, tanto para o adobe, bloco de terra comprimida e taipa, é a Nova Zelândia, pois representa um modelo equiparado a normas de outros materiais de construção, composto por uma boa definição técnica do objeto, por conter muita informação relativamente a todas as fases de construção, e também por ter a descrição minuciosa de todos os procedimentos de ensaio. Concluíram também que a maior parte da informação recolhida nas normas e regulamentos de edifícios em terra se referem a procedimentos de ensaio. Os autores aferem que deveriam abranger mais a totalidade da construção em terra. Por fim, descobriram que utilizando normas de diferentes países, referente ao mesmo ensaio de erosão, a existência de diferentes critérios de avaliação dos ensaios, obtendo-se conseqüentemente resultados e interpretações diferentes (do mesmo material) em cada norma. Sendo necessário homogeneizar os ensaios aplicados à construção em terra. É também fundamental a criação de ensaios específicos, uma vez que os existentes, foram adotados de outros campos, não sendo originalmente concebidos para a construção em terra [18,22].

Tabela 1: Normas e regulamentos e o seu conteúdo [13]

País	Norma/Regulamento	Estabilização	Técnica construtiva	Campo de aplicação						
				Seleção de solos	Requisitos dos produtos	Ensaio	Fabricação	Construção	Desenho	
Brasil	NBR 8491, 1986	X	Bloco comprimido maciço	x	x					
	NBR 8492, 1986					x				
	NBR 10832, 1989					x			x	
	NBR 10833, 1989				Bloco comprimido maciço e perfurado	x			x	
	NBR 10834, 1994				Bloco comprimido perfurado sem função estrutural	x	x			
	NBR 10835, 1994						x			
	NBR 10836, 1994							x		
	NBR 12023, 1992							x		
	NBR 12024, 1992							x		
	NBR 12025, 1990				Blocos solo-cimento			x		
	NBR 13554, 1996							x		
	NBR 13555, 1996							x		
NBR 13553, 1996		Parede monolítica sem função estrutural	x	x						
Colômbia	NTC 5324, 2004	X	Blocos maciços de solo-cimento	x	x	x				
EUA	NMAC 14.7.4, 2004		Adobe, Blocos de terra comprimida e taipa	x	x	x		x		
	ASTM E2392 M-10		Adobe e taipa	x		x	x	x		
Espanha	UNE 41410: 2008		Blocos de terra comprimida	x	x	x				
França	XP P13-901, 2001		Blocos de terra comprimida	x	x	x				

Tabela 1(Conc.): Normas e regulamentos e o seu conteúdo [13]

País	Norma/Regulamento	Estabilização	Técnica construtiva	Campo de aplicação						
				Seleção de solos	Requisitos dos produtos	Ensaio	Fabricação	Construção	Desenho	
Índia	IS 2110:1980	X	Parede <i>in-situ</i> de solo-cimento	x	x		x	x		
	IS1725:1982		Bloco de terra comprimida estabilizados	x	x	x				
	IS 13827.1993		Adobe e taipa		x				x	
Quênia	KS 02-1070:1,1999	X	Blocos de solo estabilizados com cimento e cal	x	x	x				
Nova Zelândia	NZS 4297, 1998		Adobe, bloco de terra comprimida, terra vertida, taipa	x	x	x	x	x	x	
	NZS 4298, 1998									
	NZS 4299, 1999		Adobe, bloco de terra comprimida e taipa					x	x	
Peru	NTE E 0.80, 2000	X	Adobe	x	x	x	x	x	x	
	NTP 333.201, 1979									
	NTP 331.202, 1979		Adobe, estabilizado com asfalto	x						
	NTP 331.203, 1979				x					
África regional	ARS 670, 1996		Bloco de terra comprimida	x						
	ARS 671, 1996									
	ARS 672, 1996									
	ARS 673, 1996									
	ARS 674, 1996			x	x					
	ARS 675, 1996			x	x					
	ARS 676, 1996				x					
	ARS 677, 1996				x	x				
	ARS 678, 1996								x	x
	ARS 679, 1996								x	x
	ARS 680, 1996			x					x	
	ARS 681, 1996			x					x	
	ARS 682, 1996									x
ARS 683, 1996	x	x								
Sri Lanka	SLS 1382-1:2009	X	Bloco de terra comprimida	x	x	x	x	x	x	
	SLS 1382-2:2009									
	SLS 1382-3:2009									
Tunísia	NT 21.33:1996		Bloco de terra comprimida		x	x				
	NT 21.35:1996									
Zimbabué	SAZS 724, 2001		Taipa	x	x	x		x	x	

2.1.3 Propriedades e características da construção em terra

2.1.3.1 Humidade Relativa

As construções em terra têm excelentes propriedades hidrotérmicas, isto é, têm a capacidade de trocar humidade e temperatura com a atmosfera envolvente [5,7,8,11]. Minke [5] refere que a terra é capaz de absorver e libertar humidade mais rapidamente e em maior quantidade do que qualquer outro material de construção, permitindo manter um ambiente interno controlado (Humidade Relativa entre os 40 – 60%). Refere também um caso de estudo feito numa casa nova na Alemanha, durante oito anos, em que todas as

paredes interiores e exteriores eram em terra. Com esse estudo, foi possível concluir que a Humidade Relativa era quase sempre, aproximadamente 50%, ao longo de todo o ano. A variação observada era de apenas 5 a 10%, criando assim um ambiente saudável. Nesse estudo foi mencionado também que uma camada superficial (1,5 cm) numa parede de tijolos de terra quando submetida ao aumento da humidade relativa de 50% para 80% é capaz de absorver 300 g/m² de água em 48 horas. Quando, no mesmo período de tempo, paredes de pedra calcária, de arenito, ou de pinho, da mesma espessura, só conseguem absorver cerca de 100 g/m², estuques e rebocos de 26 a 76 g/m² e tijolo maciço de 6 a 30 g/m² [5].

Torgal e Jalali [8] referiram que os comportamentos higroscópicos de materiais de construção podem ser mais eficazes na redução da humidade relativa do ar do que o uso de ventilação. Na qual dão o exemplo do hospital *Feldkirch*, na Áustria, onde construíram uma galeria de 180 m revestidas com terra batida (em alguns casos até 6 m de altura), com o único objetivo de alcançar a estabilização da humidade sem o uso de dispositivos mecânicos convencionais.

2.1.3.2 Comportamento térmico

O comportamento térmico de um elemento construtivo incluindo o revestimento, é mais eficaz, quando retém perdas de energia para o exterior, isto é, quanto menor for o coeficiente de condutividade térmica, maior será a sua resistência térmica e menor será o coeficiente de transmissão térmica. Houben e Guillaud [23] referem que construções em terra tem bom desempenho térmico (Tabela 2), pois, têm boas propriedades de inércia térmica do solo e as típicas paredes grossas de construções em terra resultam na capacidade de amortecer e atrasar variações térmicas. Isto é particularmente importante em regiões caracterizadas por grandes amplitudes térmicas diurnas, onde este comportamento particular resulta em uma temperatura interior constante e confortável (evitando assim grandes oscilações da temperatura interior).

Fathy [24] menciona um estudo onde foram construídos dois edifícios experimentais de igual volumetria, situados no Cairo, Egipto, em 1964. Um dos edifícios era constituído por paredes de terra de 50 cm de espessura e abóbadas feitas com tijolos de terra, o outro era constituído por elementos de betão pré-fabricados de 10 cm de espessura e um telhado plano. A variação de temperatura diurna exterior era de 13°C, na casa em terra a

temperatura interna apenas variou 4°C, enquanto que na casa de betão ocorreu uma variação de 16°C. Concluiu-se, que a amplitude da temperatura interna era quatro vezes maior na casa de betão comparativamente à casa em terra.

Tabela 2: Condutividade térmica para variantes da construção em terra [25]

W/(m.°C)	BTC			Adobe		Taipa	
	a	b	c	d	e	f	g
	0,81-0,93		0,93-1,04	0,46-0,81		0,81-0,93	

a- Compressão a 2MPa

b- Estabilização com 8% de cimento e compressão a 4MPa

c- Estabilização com 12 a 19% de cal e compressão a 30MPa

d- Blocos cortados diretamente do solo

e- Estabilização com 5 a 9% de emulsão de betume

f- Compressão a 90-95%. Proctor Standard

g- Estabilização com 8% de cimento e Compressão a 90-95%. Proctor Standard

2.1.3.3 Isolamento Acústico

A elevada massa das paredes de terra conferem um bom isolamento acústico (Tabela 3) [26], que comparando com soluções construtivas tradicionais é bastante elevado [11].

Torgal *et al.* [11] refere que uma parede dupla de tijolo cerâmico (15+11) e com isolamento na caixa-de-ar apresenta um índice de redução sonora de aproximadamente 50 dB. Por outro lado, Dobson [27] menciona que as alvenarias de terra possuem um baixo índice de reflexão de ondas sonoras, ao contrario das superfícies mais rígidas como as alvenarias de tijolo cerâmico que produzem um desagradável efeito de eco. Referindo também que uma parede de taipa de 0,30 m de espessura apresenta um elevado índice de redução sonora de 57 dB.

Tabela 3: Índice de redução sonora [25]

Índice de redução sonora (dB)	BTC			Taipa	
	a	b	c	d	e
Parede de 0,4m a 500Hz	60			60	
Parede de 0,2m a 500 Hz	50			50	

a- Compressão a 20 Bar

b- Estabilização com 8% de cimento e compressão a 40 Bar

c- Estabilização com 12 a 19% de cal e compressão a 300 Bar

d- Compressão a 90-95%. Proctor Standard

e- Estabilização com 8% de cimento e compressão a 90-95%. Proctor Standard

2.1.3.4 Ação sísmica

A construção em terra apresenta um deficiente desempenho sísmico, devido à reduzida resistência à tração e elevada fragilidade dos materiais, o que torna as construções pouco propensas a suportarem ações perpendiculares ao plano das paredes. Este é precisamente um tipo de carregamento que resulta da ação sísmica, através da componente horizontal das forças de inércia e da interação das paredes com paredes de contraventamento, pavimentos e cobertura. O que torna desaconselhada a construção em terra como uma solução estrutural em zonas de perigosidade sísmica não negligenciável [26].

De modo a contrariar esta limitação, têm-se investido no desenvolvimento de soluções construtivas e de reforços, de forma a diminuir a vulnerabilidade sísmica de construções em terra.

Gonçalves *et al.* [28] refere que se podem reforçar as paredes de terra com estruturas de madeira ou mesmo a associação destas paredes a uma estrutura de betão ou de aço em zonas sísmicas. Por outro lado, Lourenço *et al.* [26] reforça que a limitação de altura da construção a apenas um piso é outra forma de reduzir a vulnerabilidade sísmica destas construções. Referindo também que um dos pontos fracos da construção em terra encontra-se na zona de ligação entre paredes ortogonais, o reforço destas zonas pode ser conseguido através da inclusão de pilastras de betão armado ou pedra, que podem apresentar reentrâncias para promoverem uma ligação ainda mais eficaz.

Gomes [29] estudou a influência de diferentes soluções de reforço estrutural na resistência à ação sísmica de construções em taipa, de forma a verificar se a segurança sísmica em termos do RSAEEP (à data regulamento sísmico que divide o território nacional em 4 zonas de A a D, onde A é a mais gravosa e D a menos gravosa). A autora analisou cinco edifícios de taipa, onde foi colocando reforços diferentes: i) Moradia de R/C e alvenaria de taipa com vergas de madeira em portas e janelas; ii) Moradia idêntica à anterior, diferindo da primeira por ter cunhais em pedra assim como vergas, peitoris e ombreiras; iii) Moradia idêntica à anterior, reforçada com tirantes de Ø16 em aço A400; iv) Moradia idêntica à anterior, em que os tirantes de aço são substituídos por uma viga de bordadura em betão armado e secções 0,2×0,2 m²; v) Moradia idêntica á anterior, com pilares de 0,2×0,2 m² (Figura 4).

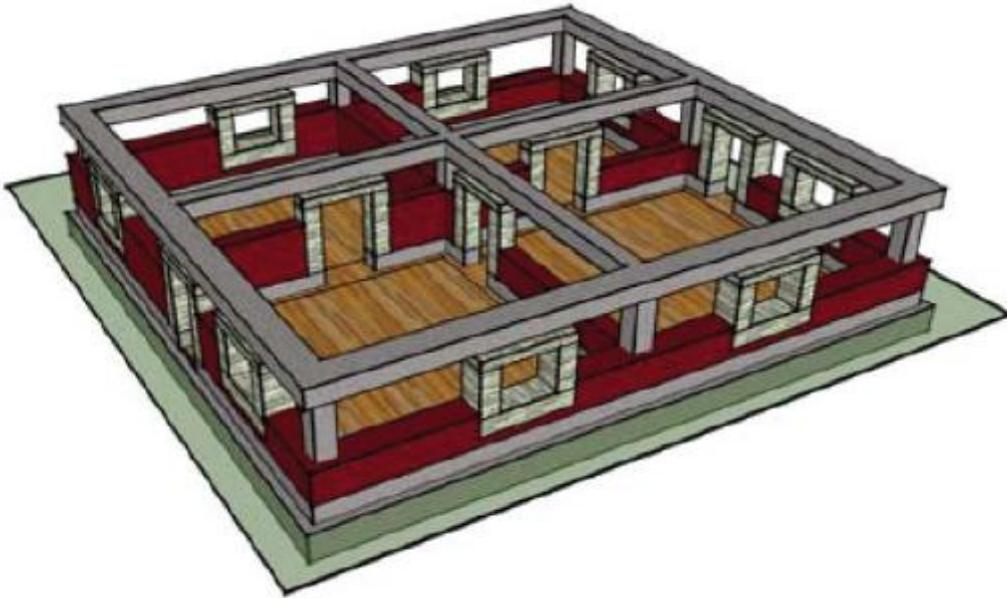


Figura 4: Modelo estrutural correspondente à quinta medida de reforço [29]

2.1.4 Vantagens da construção em terra

A terra é um dos primeiros materiais de construção utilizados pelo homem, mas com o avanço tecnológico assistiu-se a um declínio deste tipo de construção em detrimento de novos materiais e novas técnicas de construção que foram surgindo. Porém, quase todos os novos materiais e novas técnicas conduzem um elevado impacto ambiental e podem levar a um esgotamento dos recursos naturais. Algo que não acontece com as construções em terra.

Tendo em conta a atual situação do planeta, onde o setor de construção é responsável por [8,30,31]:

- 30% das emissões de dióxido de carbono;
- consumir mais matéria prima (cerca de 3000 Mt/ano, quase 50% do peso) do que qualquer outra atividade económica;
- cerca de 50% da produção de resíduos na União Europeia;
- o consumo energético dos edifícios representa 40% do consumo de energia global, no qual 75% dessa energia é produzida a partir de combustíveis fósseis.

A terra como material de construção, pode ser uma solução eficiente de modo a minimizar esses problemas. Thormark [32] afirma que uma escolha adequada dos materiais de construção pode significar uma redução de 17% da energia incorporada no edifício. Sendo que, Gonzalez e Navarro [33] mencionam que uma escolha correta de materiais de construção pode reduzir em 30% as emissões de CO₂. A principal vantagem de utilizar terra como material de construção, é permitir efetuar uma construção altamente sustentável, tendo outras inúmeras vantagens, tais como [5,8,10,11,15,19,25,26,28,34,35]:

- Recurso natural em abundância e inesgotável;
- A produção de resíduos é praticamente insignificante, pois, pode ser simplesmente depositado no local de extração sem que haja qualquer risco ambiental e, caso o solo esteja estabilizado, pode ser reutilizado para este tipo de construção, por isso, podemos considerar que a construção da terra dificilmente gera resíduos.
- Processo de construção simples, porém para alguns processos construtivos é aconselhado o supervisionamento por uma pessoa experiente, as técnicas de construção em terra podem geralmente ser posta em prática por amadores. Torna-se ideal para autoconstrução, requer mão de obra intensiva e ferramentas de baixo custo;
- Baixas emissões de CO₂ (Figura 5), comparando com outras soluções construtivas. Para uma casa com três quartos e uma área de 92 m² com paredes de terra os valores representam uma redução de 7 toneladas de CO₂ em relação ao tijolo cerâmico e uma redução de 14 toneladas de CO₂, se forem utilizados blocos de betão;

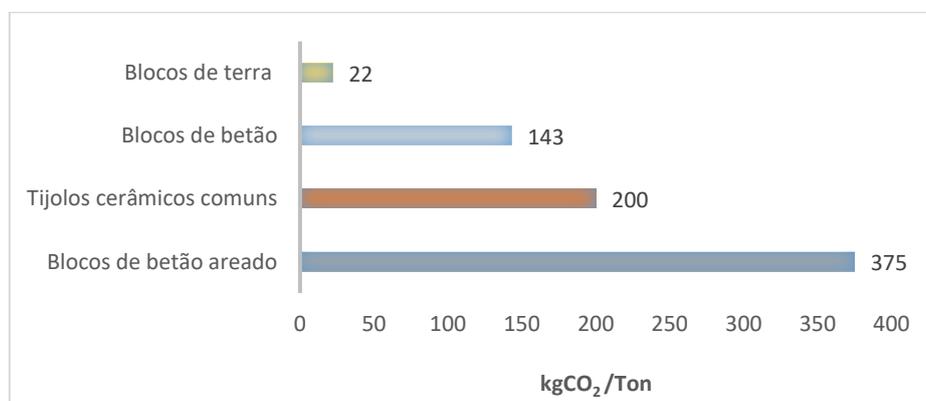


Figura 5: Carbono incorporado em diferentes materiais utilizados em alvenaria [25]

- Material de construção não tóxico;
- Bom isolamento acústico e bom isolamento térmico;
- Tijolos de terra absorvem 50 vezes mais humidade (vapor de água) do que tijolos cozidos;
- Baixa energia incorporada, comparando com outras soluções construtivas. Uma vez que a terra local pode ser utilizada na construção sem ser necessário despende energia com o seu transporte (Tabela 4) e processamento. Lourenço [25] refere que a energia incorporada em edifícios em terra é metade da energia incorporada da construção convencional;

Tabela 4: Energia no tipo de transporte [36]

Tipo de transporte	MJ/ton km
Avião	33 - 36
Autoestrada (diesel)	0,8 - 2,2
Ferrovias (diesel)	0,6 - 0,9
Ferrovias (eletricidade)	0,2 - 0,4
Barco	0,3 - 0,9

- Mantém um ambiente interno controlado (Humidade Relativa entre os 40 – 60%). Podem ser mais eficazes na redução de Humidade Relativa do ar do que o uso de ventilação;
- Boa resistência ao fogo, uma vez que é um material incombustível;
- A construção em terra em países em desenvolvimento é economicamente benéfica, já em países desenvolvidos depende de vários fatores, tais como: técnica de construção, custos de mão-de-obra, processo de estabilização, durabilidade e necessidades de reparo.
- Oportunidade de criação de empregos, permitindo a pessoas não qualificadas e desempregadas a possibilidade de se profissionalizarem e consequentemente conseguirem obter emprego e aumentarem os seus valores sociais;
- Preserva naturalmente a madeira e outros materiais orgânicos.

2.1.5 Desvantagens

Como já discutido anteriormente, a principal desvantagem da construção em terra é a falta de regulamentos e normas, com vista a regulamentar este tipo de construção e a maioria existente, deveria abranger mais a totalidade da construção em terra. Outras desvantagens referidas [5,15,19,26,28,35,37]:

- A terra não é um material padronizado, dependendo do local que é extraída, têm certas características, que diferem de local para local. Para certa aplicação específica, pode ser necessário alterar a sua composição. Esta pode ser natural ou com recurso a estabilizadores.
- Baixas propriedades mecânicas, - em geral as construções em terra não estabilizadas apresentam baixa resistência (especialmente resistência à compressão) e comportamento frágil (alta vulnerabilidade sísmica), limitando a construção a 1 ou 2 andares em zonas de risco sísmico moderado;
- Retração elevada, devido à perda de água por secagem;
- Suscetibilidade à água, o que por vezes requer a estabilização por adição de ligantes (cal, cimento ou betume) ou outras formas de proteção (reboco de desgaste, prolongamento do beiral, etc.);
- Manutenção mais frequente - as construções em terra requerem manutenção com mais frequência do que as construções com materiais modernos;
- Baixa resistência ao impacto e abrasão se não for devidamente protegida;
- Preconceitos contra a terra como material de construção, muitas pessoas têm dificuldade em entender como um material natural como a terra não necessita ser tratado. Considerando a terra como um material de construção de qualidade inferior.

Como descrito nas vantagens a terra é um recurso natural e abundante, contém baixa energia incorporada e a produção de resíduos é praticamente insignificante, trazendo inúmeras vantagens em termos de sustentabilidade. Apresentado poucas desvantagens, sendo a maioria, minoradas com a execução de um bom projeto, relativamente à vulnerabilidade sísmica, em zonas mais gravosas, caso o edifício tenha mais de dois andares, podendo-se optar por uma estrutura convencional e usar a alvenaria em terra, reduzindo na mesma a pegada ecológica.

2.2 Testes de caracterização

O solo é constituído por matéria orgânica (plantas, animais em decomposição, etc.) e, até certa profundidade, por matéria mineral (argilas, siltes e material arenoso), ocorre sobretudo da desagregação das rochas, em virtude da ação dos agentes físicos, químicos e biológicos. Por vezes a deposição dessas partículas, por ações dos agentes de transporte, ocorre em zonas distintas da sua origem, formando os solos com diferentes constituintes. O material utilizado como matéria prima na construção em terra, é apenas a matéria mineral.

Atualmente, não existe nenhuma regra clara que discrimine a capacidade de ser utilizado um material de construção unicamente através das suas características granulares e suas propriedades mineralógicas. Sendo por isso necessário realizar testes para determinar o desempenho para uma certa aplicação específica. Uma definição clara desses testes requer um bom entendimento das especificações da terra, assim como a identificação dos principais parâmetros que orientam o seu comportamento [7].

Os testes de caracterização permitem quantificar o tipo de propriedades existente na matéria mineral, nomeadamente a sua granulometria, o seu comportamento mecânico e o seu comportamento à deformação para um determinado nível de humidade. Os ensaios podem ser subdivididos, em ensaios a realizar em campo e em ensaios de laboratório. Em determinadas situações os testes em laboratórios podem ser dispensados [38].

2.2.1 Ensaios de campo

Estes ensaios permitem determinar algumas conclusões relativamente ao tipo de solo. Porém, os resultados deste tipo de ensaios são pouco fiáveis. Os ensaios descritos posteriormente são uma adaptação de ensaios utilizados pelo grupo francês CRAterre [39]:

a) Observação da cor

Solos com cor escura, normalmente são solos com presença de matéria orgânica. Solos pálidos, identificam a presença de areias quartzosas ou feldspáticas. Já os solos com cor vermelha, pode significar a presença de óxido de ferro.

b) Teste do cheiro

Um forte cheiro a húmus identifica um solo orgânico, esse cheiro é potenciado pelo aquecimento ou humedecimento desse solo.

c) Teste do tato

Identifica-se o tipo de solo ao esfregar a amostra entre as mãos, a presença de um solo arenoso dá-se pelo facto de ser áspero. Solos plásticos ou viscosos quando húmidos, indicam elevada quantidade de argila.

d) Teste do brilho

Através de uma bola de solo ligeiramente humedecida e cortada por uma faca, se houver predominância de silte apresentará uma superfície opaca ou uma superfície brilhante se houver predominância de argila.

e) Teste de aderência

Na mesma bola de solo que foi executado o teste do brilho, penetra-se com uma espátula. Se a penetração for difícil e a terra aderir à espátula, trata-se de um solo argiloso. Caso contrário, se a espátula entrar e sair com facilidade, trata-se de um solo saibroso.

f) Teste de sedimentação

Com recurso de um frasco com capacidade de um litro, enche-se $\frac{1}{4}$ com solo e completa-se o restante com água. Agita-se e deixa-se repousar por uma hora, repetindo o procedimento duas vezes. Por fim, mede-se a espessura das camadas, de areia, de silte e de argila.

g) Teste visual por peneiração expedita

Com recurso a dois peneiros da série ASTM, nº 200 (0,075 mm) e nº 10 (2 mm), passa-se o solo seco, completamente solto, no peneiro nº 200 e a parte retida é passada depois no peneiro nº 10. Através da comparação do tamanho dos montículos de solo que passam em cada peneiro é possível fazer uma classificação grosseira do solo, isto é, se o montículo que passou no peneiro nº 200 (areia e silte), for maior que o montículo retido, será um solo argiloso. Caso contrário, está-se na presença de um solo arenoso ou pedregoso. O peneiro nº 10, serve para determinar se o solo se é arenoso

ou pedregoso, caso seja um solo pedregoso, o montículo de solo passado tem que ser inferior ao retido e será um solo arenoso no caso contrário.

h) Teste de retenção de água

Faz-se passar uma amostra de solo por um peneiro com uma malha de 1 mm. Com o material retido faz-se uma bola do tamanho de um ovo e acrescenta-se água para a manter unida sem que esta cole às mãos. Pressiona-se a bola na palma da mão e de seguida golpeia-se fortemente com a outra mão. Se a bola ficar esmigalhada e aparecer água à superfície aos 5 a 10 golpes, trata-se de um solo composto por areia fina ou silte grosso. Caso só apareça água à superfície aos 20 a 30 golpes e a bola não ficar esmigalhada, trata-se de uma silte ligeiramente plástica ou de uma argila siltosa. Se não houver nenhuma reação aos golpes, trata-se de um solo com elevada quantidade de argila.

i) Teste de resistência à secagem

Tomam-se três porções de solo retido num peneiro de malha de 1 mm, espalma-se ligeiramente de modo a ficarem com 1 cm de espessura e 5 cm de diâmetro. Posteriormente, colocam-se as amostras de solo a secar ao sol. Através do aperto entre o polegar e o indicador, pode-se classificar o solo como argila, se não se desfizer, como argila arenosa ou siltosa caso a amostra só se desfizer após algum esforço, e uma areia se o solo se desfizer facilmente.

2.2.2 Ensaio Laboratoriais

Para determinar certas propriedades e características do solo é necessário recorrer a ensaios laboratoriais. Estes têm um nível elevado de fiabilidade, pois, seguem procedimentos normalizados. No entanto, necessitam de equipamentos específicos, tornando-os mais dispendiosos.

a) Teor em água

Ensaio que compara a massa de uma amostra de solo antes e depois de seca numa estufa à temperatura de 105 °C.

b) Matéria orgânica

Aquece-se a uma amostra de solo a 400 °C, de forma a calcinar a matéria orgânica e através da diferença de massas conhece-se a quantidade de material calcinado.

c) Análise granulométrica

Permite determinar as percentagens mássicas da fração arenosa do solo acima de 0,075 mm (peneiro nº 200 ASTM), obtidas por peneiração através de uma coluna de peneiros normalizados. De modo que ocorra a desagregação das partículas mais finas, a peneiração é efetuada por via húmida (LNEC E 239:1970). O solo retido em cada peneiro é seco em estufa, para determinar a percentagem em relação á massa da amostra. Para determinar os diferentes constituintes do solo abaixo de 0,075 mm (siltes e argilas), o ensaio de sedimentação (LNEC E 196:1966). O solo é colocado em suspensão num líquido, para determinar a velocidade de sedimentação, através da lei de Stokes, conseguimos determinar o diâmetro das partículas.

d) Limites de consistência

Conhecidos também como limites de Atterberg, são constantes físicas que permitem determinar o comportamento do solo inferior a 0,4 mm em presença de água. Os limites de consistência determinados pela norma NP 143:1969, é composto por limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (Ip) que se obtém através da diferença entre os limites anteriores (LL-LP) e o limite de retração (LR).

e) Compactação com ensaio Proctor

Permite determinar o teor de água ótimo que corresponde à máxima compacidade do solo. Faz-se passar uma amostra de solo no peneiro nº4 (4,76 mm), onde se adicionam teores de água crescentes com diferenças de 2%, a qual é compactada em três camadas com 25 pancadas por camada, com recurso a um aparelho manual ou mecânico. Posteriormente regista-se a massa e o volume e num gráfico marca-se a massa volúmica seca versus teor em água. Determinando assim o teor de água ótimo que corresponde à baridade máxima.

f) Ensaio de resistência à compressão simples

Consiste em levar à rotura um provete de terra, por aumento de carga axial. Similar aos ensaios de provete betões, etc..

Sendo a terra um material não padronizado é preciso proceder à sua caracterização. Através dos resultados dos ensaios, é possível quantificar o tipo de propriedades e características existentes e prever a sua adequação para ser utilizado como material de construção.

2.3 Estabilização do solo

Após feita a caracterização do solo, relacionam-se os resultados obtidos com as técnicas construtivas mais apropriadas para aquele tipo de solo [10]. Porém, quando um solo não apresenta as características necessárias em termos de comportamento mecânico, índice de coesão e/ou retração, pode recorrer-se a métodos de estabilização (Tabela 5), pois melhoram o desempenho da terra como material de construção [40]. Os tipos de estabilização de solos para a construção em terra subdividem-se em:

Tabela 5: Tipos de estabilização do solo [40]

Tipos de estabilização	Mecânica	Com recurso à compactação e/ou adição de fibras é possível alterar a resistência mecânica, a porosidade, a permeabilidade e a compressibilidade.
	Física	Através da mistura controlada de partículas de diferente composição e granulometria permite modificar a textura da terra; também se obtém os mesmos resultados com tratamentos térmicos e elétricos.
	Química	Por meio de adição de aditivos é possível alterar as características da terra.

2.3.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica visa melhorar as características do solo através de uma melhor organização das suas partículas sólidas, diminuindo assim o número de vazios e aumentando as qualidades descritas anteriormente.

Existem três tipos de compactação [40]:

- **Compressão estática:** é exercida uma força por uma prensa (mecânica ou hidráulica);
- **Compressão dinâmica por impacto:** a força é exercida por impacto, cujo impacto provoca uma onda de choque e de pressão, colocando as partículas em movimento;
- **Compressão dinâmica por vibração:** através de aparelhos mecânicos de vibração, cria-se uma série de impactos rápidos sobre o solo, eliminando temporariamente a fricção interna, permitindo a reorganização das partículas;

Hoffmann [41] refere que para a taipa, o maior responsável pela estabilização da terra é a energia de compactação. Riza *et al.* [42] concluiu que em BTC um aumento de tensão de 5 para 20 MPa, conduz a uma melhoria na resistência à compressão até 70%.

2.3.2 Estabilização Física

A estabilização física serve para fazer correções da composição granulométrica do solo, essas correções podem ser [11,40]:

- **Solo com excesso de elementos finos:** adição de um solo arenoso ou uma operação de lavagem, esta última opção poderá não ser muito benéfica pois pode retirar na totalidade os elementos finos;
- **Solo com excesso de elementos grossos:** peneirar o solo com um peneiro de malha igual à dimensão pretendida;

2.3.3 Estabilização Química

Neste tipo de estabilização existem diversos aditivos químicos, que funcionam como ligantes que permitem aglutinar o solo através de reações químicas, melhorando assim as suas propriedades. A escolha do tipo de ligante está relacionada com as características do solo que se pretende melhorar.

Seguidamente, apresentar-se-ão alguns tipos de ligantes [37,40]:

- **Cimento:** agrega as partículas e torna a argila mais estável;
- **Cal:** permite a dissolução de minerais argilosos;
- **Betume:** melhora a ligação dos solos de fraca coesão e aumenta a resistência do solo à ação da água;
- **Cinza volante:** envolve as partículas e aumenta a sua resistência.

O grupo CRAterre recomenda para a construção em terra, que a estabilização com cimento seja entre 6 a 10% [11].

No fabrico de BTC, tem sido recorrente estabilizar com cimento, embora seja expetável que a utilização de cal passe a ser a solução mais corrente, pois é mais barato e mais sustentável [11]. Também estabilizando com cinza volante se conseguem níveis superiores aos exigidos em normas internacionais para BTC, diminuindo assim também o impacto ambiental da estabilização química convencional [37].

2.4 Técnicas de construção em terra

Como já descrito anteriormente a construção em terra é a técnica de construção mais antiga do mundo. Sendo um tipo de construção vernacular, a escolha de cada método está diretamente ligada com o tipo de solo disponível e a cultura construtiva na região, existindo assim, diversos métodos construtivos diferentes que usam a terra como material de construção [43].

O grupo CRATerre distingue 18 famílias diferentes de sistemas de construção antigos e modernos, que utilizam a terra como matéria prima [44]. Classificadas por três sistemas de construção: monolítica (*in situ*), em alvenaria (unidade) e como enchimento de uma estrutura de suporte (Figura 6 e Figura 7).

No presente trabalho, serão abordadas as duas principais técnicas construtivas no nosso país, nomeadamente taipa e adobe, e também serão abordados os BTC, pois estes são o objeto de estudo desta dissertação.

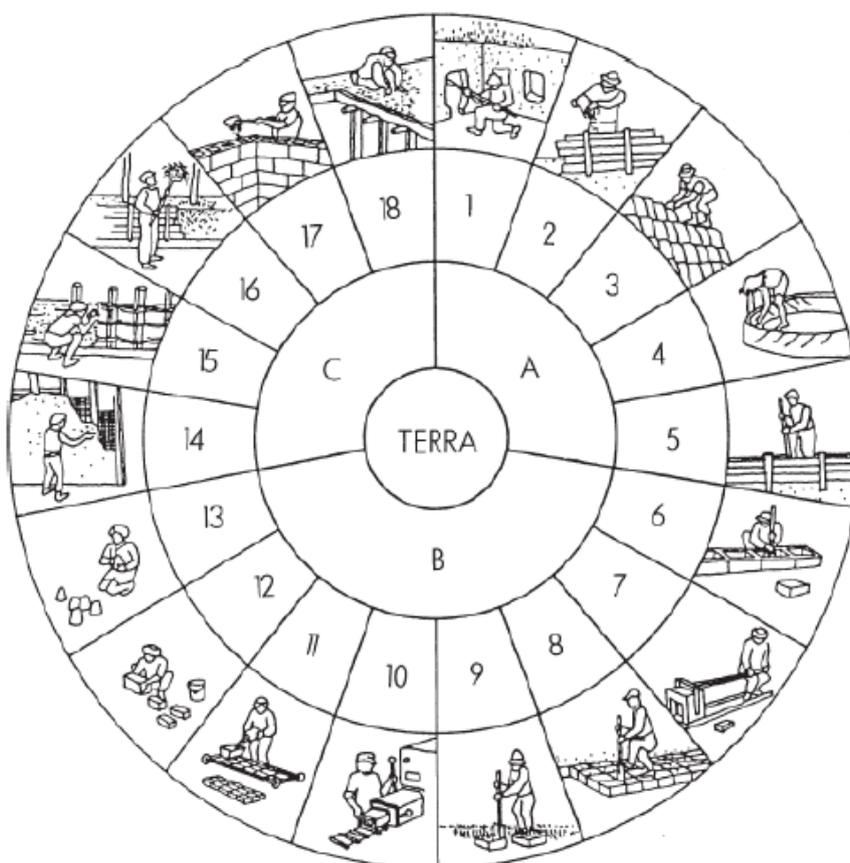


Figura 6: Diagrama estabelecido pelo grupo CRATerre [44]

A Monolítica (<i>in situ</i>)	B Alvenaria (unidade)	C Enchimento de uma estrutura de suporte
1- Terra escavada	6- Blocos apiloados	14- Terra de recobrimento
2- Terra plástica	7- Blocos de terra comprimida (BTC)	15- Terra sobre engradado
3- Terra empilhada	8- Blocos cortados	16- Terra palha
4- Terra modelada	9- Torrões de terra	17- Terra de enchimento
5- Terra compactada (Taipa)	10- Terra extrudida	18- Terra de cobertura
	11- Adobe mecânico	
	12- Adobe manual	
	13- Adobe moldado	

Figura 7: Legenda do diagrama estabelecido pelo grupo CRAterre [44]

2.4.1 Taipa

É um sistema de construção monolítica, que consiste em compactar a terra ligeiramente húmida. A granulometria média de uma terra destinada a taipa deve conter [40]:

- Argila: 15-25% ;
- Silte: 20-35% ;
- Areia: 40-50% ;
- Gravelha: 0-15% ;

Esta técnica consiste na edificação de paredes monolíticas em terra. A construção de alvenaria em taipa é normalmente constituída por blocos desconstruídos de grandes dimensões (Figura 8).



Figura 8: Construção em taipa tradicional, Mumemo, Moçambique [45]

Para formar estes blocos, utiliza-se uma espécie de cofragem, designada por taipal tradicional (Figura 9), constituída por dois taipais laterais (pranchas desmontáveis), por dois a três costados de cada lado, são tábuas pregadas verticalmente que junto com as agulhas fazem o travamento do molde, uma comporta podendo esta ser opcional, pois o seu uso depende do tipo de união entre blocos e uma cangueta que se utiliza para unir os costeiros que pode ser substituída por uma corda entrelaçada.

Os taipas tradicionais podem ser diferentes entre si, tanto na sua configuração, como nos seus componentes, mas os seus princípios de utilização são idênticos.

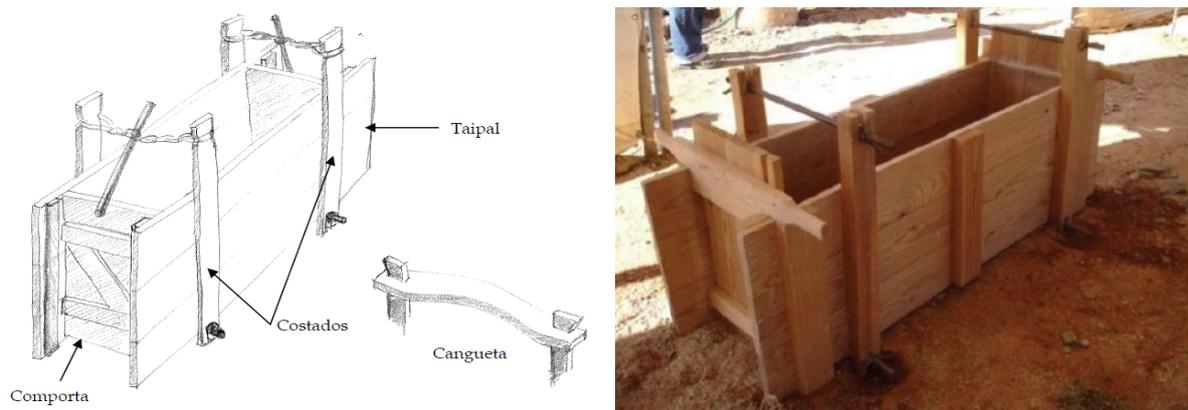


Figura 9: Taipal tradicional [11]

Em Portugal, a construção em taipa é feita em blocos com 0,50 m de altura, 0,40 a 0,70 m de largura e 2 m de comprimento. As fundações tradicionais eram executadas em alvenaria de pedra (Figura 10), com o intuito de evitar a ascensão da humidade nas paredes de taipa [11].

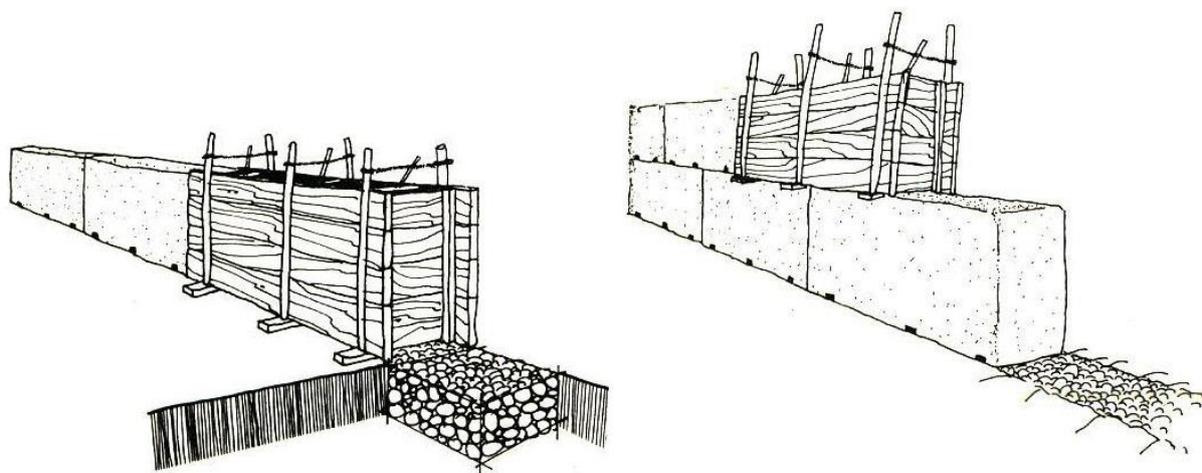


Figura 10: Construção de uma parede em taipa tradicional [46]

Em pequenas obras ainda se utiliza este processo de construção tradicional, onde a terra é compactada em camadas aproximadamente de 10 cm, até formar o bloco, posteriormente o taipal é removido e reerguido para a camada seguinte, até se obter a altura da parede pretendida [11].

Na taipa tradicional faz-se a compactação manual com auxílio a peças de madeira, designadas por pilões, maços ou malhos (Figura 11). Maniatidis & Walker [47] referem que uma equipa de três trabalhadores podia executar 1,5 a 3 m³ de taipa diariamente, com recurso a compactação manual.



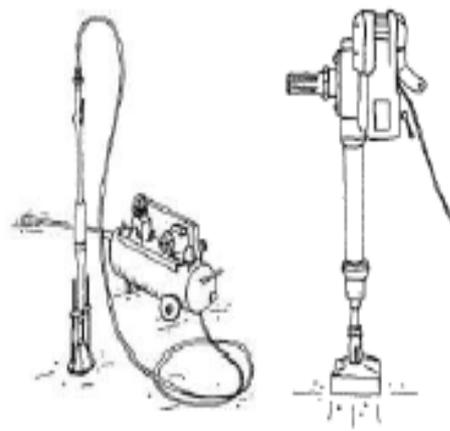
Figura 11: Compactação manual [11]

Mais recentemente, com o avanço tecnológico, desenvolveu-se a taipa mecanizada (Figura 12-(a)), esta é idêntica à taipa tradicional, diferenciando-se na qualidade e dimensões da cofragem e no meio de compactação (compactador pneumático (Figura 12-(b))) [11]. Atualmente, utilizam-se diversos materiais nas cofragens, nomeadamente: contraplacado, alumínio, aço e a fibra de vidro [40]. Também nas fundações além da alvenaria de pedra, começaram a ser executada em betão armado [11].

Minke [5] menciona que construir em taipa de forma tradicional, incluindo preparação, transporte e construção é de cerca de 20 a 30 h/m³. Refere também que se se aperfeiçoar o sistema de cofragem e recorrer a um compactador pneumático são necessárias apenas 10 h/m³.



(a)



(b)

Figura 12: Taipa mecanizada: a) Construção em taipa com cofragens metálicas [47], b) Compactador pneumático [6]

2.4.2 Adobe

Como já referido anteriormente, esta é a técnica de construção em terra mais antiga do mundo, deve-se sobretudo à facilidade de fabrico e do método de construção. Segundo a norma peruana NTE E 080 (SENCICO, 2000) [48] a granulometria média deve conter:

- Argila: 10-20%;
- Silte: 15 a 25%;
- Areia: 55-70%;

O adobe é fabricado com um solo argiloso, onde se adiciona água para trabalhar o solo em estado plástico. Por se utilizar um solo argiloso, adicionam-se palha ou outras fibras vegetais, de modo a evitar o aparecimento de fissuras, criadas quando esta seca devido à retração. Após formar a pasta, enche-se o molde ou atira-se a pasta com força para o molde, com quanto mais força a pasta for atirada, melhor é a compactação e a resistência depois de seca [5], sem necessidade de compressão, são desmoldados ainda no estado fresco (Figura 13-(a)), secando ao ar livre durante vários dias (Figura 13-(b)), dependendo das condições climatéricas da região. Em Portugal, os tempos médios de secagem variam entre as 3 semanas e 1,5 meses [40].

Minke [5] menciona que um trabalhador por dia consegue produzir 300 blocos, desde a preparação da mistura, o transporte e arrumação.



Figura 13: Fabrico do adobe: a) Desmoldagem do molde [26], b) Secar ao ar livre [3]

A forma de construir é semelhante à colocação do tijolo convencional (Figura 14-(a)), o assentamento é realizado com argamassa à base de terra, de modo a obter melhor conexão entre materiais [11]. Tradicionalmente os moldes são constituídos por madeira e permitem a execução de 1 ou 2 blocos. Existem diversos formatos e dimensões de moldes (Figura 14-(b)).

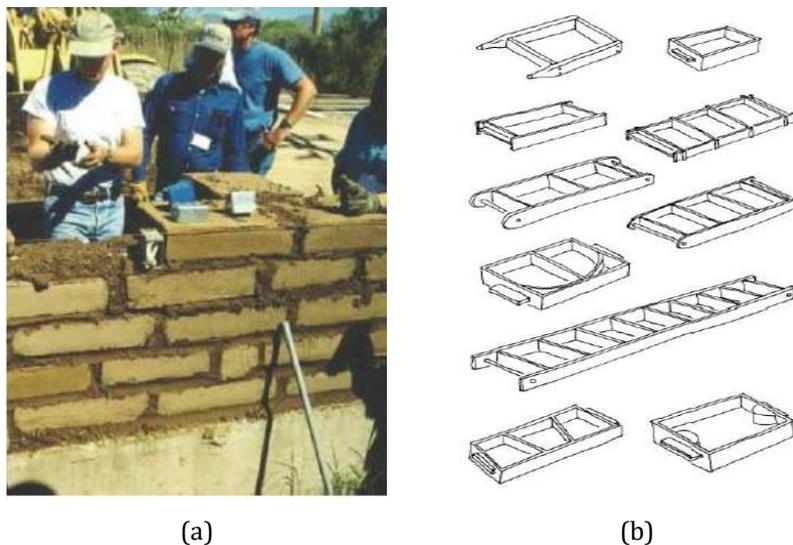


Figura 14: a) Alvenaria de adobe [11], b) Diversos tipos de moldes [5]

Atualmente, existem outros métodos do fabrico de adobe, nomeadamente o adobe mecanizado e adobe *in-situ*. O adobe mecanizado (Figura 15) faz jus à tecnologia atual, utilizando máquinas semelhantes às máquinas agrícolas, possibilitando um fabrico mais rápido. A Sul de Portugal, já existem duas empresas a utilizar esta técnica de fabrico e construção.



Figura 15: Produção de adobe mecanizado [11]

Os blocos de adobe *in-situ* (Figura 16), são moldados de forma semelhante à taipa, com a exceção de não serem compactados. Os adobes podem secar no próprio molde ou podem ser desmoldados logo de seguida, permitindo obter diversas formas e texturas.

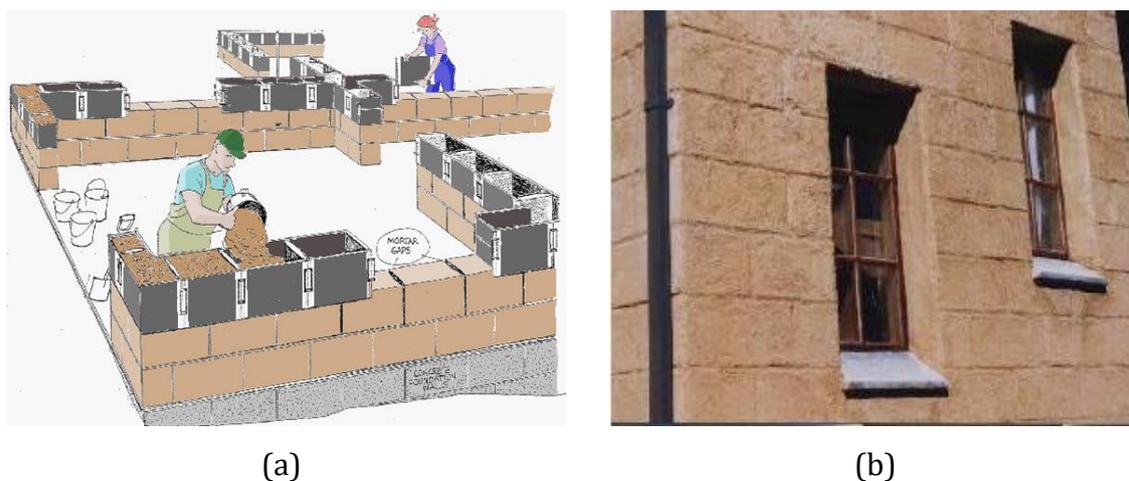


Figura 16: a) Execução adobe moldado *in-situ* [27], b) Edifício em adobe moldado *in-situ* [5]

2.4.3 Blocos de terra comprimida (BTC)

Os Blocos de Terra Comprimida (BTC) foram desenvolvidos na Colômbia pelo engenheiro Raúl Ramirez, em 1956, no centro de pesquisa CINVA, que desenvolveu a primeira prensa manual para compactar blocos de terra, a CINVA-Ram [11,40].

Os BTC são essencialmente uma evolução dos adobes, por estabilização mecânica, onde se prensa o solo num molde, permitindo assim melhorar algumas características em comparação ao adobe [40]:

- São mais regulares em forma e em dimensões;
- Têm maior resistência à compressão;
- São menos suscetíveis à água;
- Através da pressão exterior é conseguida uma melhor ligação das partículas;
- Permitem menores prazos de construção;
- A produção de BTC pode ser realizada durante todo o ano.

A composição granulométrica para fabricação dos BTC também varia comparativamente com os adobes. Segundo diferentes literaturas e regulamentos, a composição adequada é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Composição granulométrica adequada para BTC [49]

	Grupo CRAterre Rigassi (1985)	Norma Australiana HB 195 (2002)	Barbosa (2002)	Norma Colombiana NTC 5324 (2004)	Manual do BTC Uruguai (2006)	Norma Espanhola UNE 41410 (2008)
Areia/Seixo	25-80%	45-80%	50-70%	28-82%	40-80%	28-82%
Silte	10-25%	10-30%	10-20%	15-50%	0-20%	15-50%
Argila	8-30%	5-25%	10-20%	10-30%	5-35%	10-30%

Estes blocos são capazes de substituir na totalidade os blocos cerâmicos convencionais, quer seja em alvenaria simples de vedação ou alvenaria estrutural, contanto que atendam às resistências estabelecidas no projeto [10]. A forma de construir é muito simples, igual ao adobe e semelhante ao tijolo convencional.

Os BTC quando fabricados com perfurações (Figura 17), além de permitir o reforço da estrutura (Figura 18-(a)), também permite a passagem de tubagens (Figura 18-(b)), para redes hidráulicas, de energia e de telefone, que são colocadas durante a execução da alvenaria, sem abertura de roços [11].

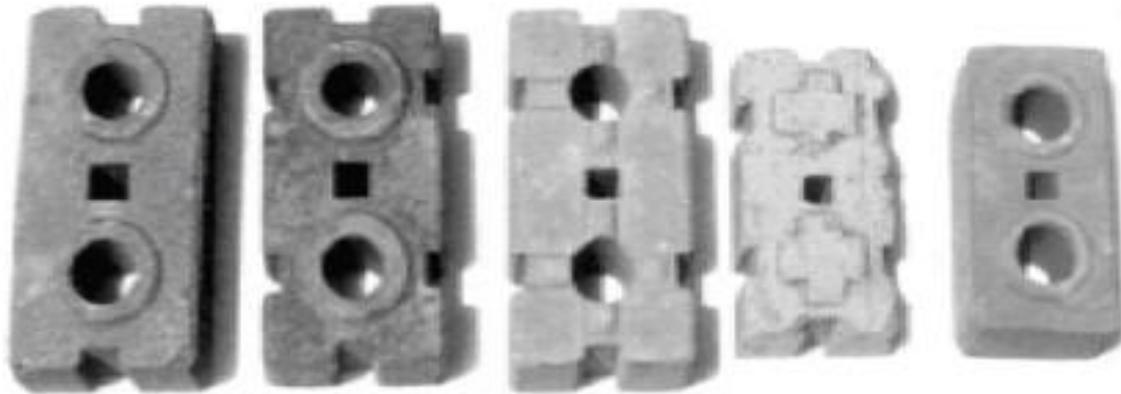


Figura 17: BTC encaixe macho fêmea [11]

Atualmente, o bloco de terra comprimida é o material de construção em terra mais utilizado [40]. Em Portugal, esta técnica ainda é pouco frequente, mas no entanto tem vindo a aumentar o interesse, dado as suas características e sustentabilidade [11].



Figura 18: BTC com perfurações: a) Reforço da alvenaria [10], b) Alvenaria de BTC com instalações elétricas [11]

Os BTC podem ser prensados em prensas manual e prensas automatizadas. Existem diversas prensas manuais, que são baseadas no mecanismo da CINVA-Ram (Figura 19), podem conter mais do que um molde. Aplicam pressões na ordem dos 2 MPa. As prensas manuais requerem mais mão de obra e tempo de fabrico [11]. Estas por sua vez, requerem baixo capital para a sua aquisição e manutenção, são leves, pequenas e fáceis de usar, são mais sustentáveis em termos energéticos e facilidade de transporte, podendo ser fabricadas no próprio terreno [10,11].

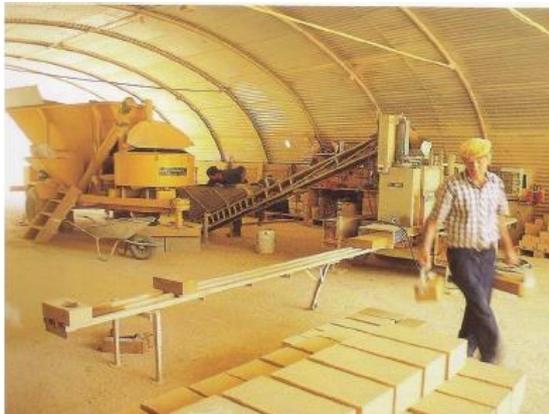


Figura 19: Execução de BTC com a prensa CINVA-Ram: a) Enchimento do molde com terra, b) Confinamento da mistura, c) Elevação do BTC, d) Retirada do BTC [11]

Os BTC ao saírem da prensa, já são sólidos o suficiente para serem manipulados. A sua resistência máxima só é atingida depois do período de cura, este varia consoante se foi ou não estabilizado, e se foi, varia em função do tipo de estabilizador. O processo de secagem depende das condições higrométricas do local e deve secar num ambiente quente e húmido [40]. No caso de estabilização com cimento, 14 dias de cura são indispensáveis e 28 dias são os recomendados. No caso de estabilizado com cal, 30 dias de cura são indispensáveis e 90 dias são os recomendados [50].

Na fabricação de BTC em prensas hidráulicas automatizadas (Figura 20), o bloco é compactado sem requerer força manual, apresentando, por isso, ainda melhores características, pois permite uma maior reorganização das partículas, existindo menor quantidades de vazios. É um processo de fabrico mais rápido, especialmente em máquinas que prensam diversos blocos ao mesmo tempo. Podem ser fixas ou móveis. As prensas móveis permitem executar blocos no local da obra, utilizando terra do local, permitindo uma maior rapidez do fabrico. Sendo também mais sustentável, pois evita o transporte dos blocos [11].

As prensas totalmente automatizadas, só são económicas a longo prazo, pois é necessário um investimento avultado e a matéria prima ser abundante, de consistência regular (por vezes requerem que tenha trituradoras e misturadoras) e disponível localmente [5].



(a)



(b)

Figura 20: Prensas hidráulicas motorizadas para fabrico de BTC: a) Fixa [51], b) Móvel [11]

Na Tabela 7, encontram-se a produtividade (BTC/dia), consoante o tipo de prensa.

Tabela 7: Produtividade das prensas [52]

Tipo de prensa		Energia de compactação (MPa)	Taxa de compactação do solo*	Produção (BTC/dia)
Manual	Mecânica	1,5 - 2,0	1,38	300 a 1.200
	Hidráulica	2,0 - 10,0	1,65	2.000 a 2.800
Automatizada	Mecânica	4,0 - 24,0	>1,65	1.600 a 12.000
	Hidráulica	>20,0	>2,00	2.000 a 4.000

*Corresponde à relação entre mistura em estado solto e em estado compactado, sendo proporcional à energia de compactação

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentada a descrição e caracterização dos materiais utilizados, procedimentos e respetivos equipamentos necessários para a elaboração dos ensaios realizados.

3.1 Caracterização do solo

O objetivo desta dissertação é o estudo de um material, os BTC, usado para a construção de edifícios em terra. Primeiramente, foi necessário fazer-se a caracterização do solo usado para a produção dos blocos de terra comprimida em estudo, para se perceber algumas das características apresentadas na caracterização dos BTC.

Antes de proceder à caracterização do solo, foi necessário fazer um pré-tratamento que consistiu no espalhamento do solo numa bancada e consequentemente ao seu destorroamento (Figura 21) com objetivo de promover a separação das partículas sem a alteração da sua granulometria, de seguida realizou-se o esquartelamento do solo (Figura 22), efetuado várias vezes de modo a distribuir as partículas uniformemente. Por fim, o solo foi separado em diferentes amostras para se proceder à sua caracterização.



Figura 21: Destorroamento do solo



Figura 22: Esquartelamento do solo

3.1.1 Distribuição granulométrica das partículas do solo

A distribuição granulométrica das partículas de solo foi determinada por crivagem por via seca e via húmida e por um teste com sedimentação (de modo a determinar a granulometria do solo passado no peneiro #200 (0,075 mm)).

3.1.1.1 Distribuição granulométrica determinada por via seca

A análise granulométrica destina-se a determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas que constituem o solo dos provetes em estudo.

Após efetuado o esquartelamento do solo, recolheram-se duas amostras, cada uma com 1 kg (Figura 23-a) e inseriu-se na coluna dos peneiros (Figura 23-b), constituída pelos peneiros ISO 3310-2:1999 de abertura de 31,500 mm até ao de 0,125 mm e do peneiro ISO 3310-1:2000 de abertura 0,063 mm. A crivagem foi efetuada com movimentos horizontais de translação e rotação, executada com três peneiros de cada vez de modo a facilitar os movimentos, onde se colocava a tampa e o fundo, após um minuto, procedeu-se a pesagem do solo retido em cada peneiro. O solo que ficava retido no fundo inseria-se na coluna do peneiro restante e realizava-se os passos descritos anteriormente até ter a distribuição quantitativa de toda a amostra de solo.

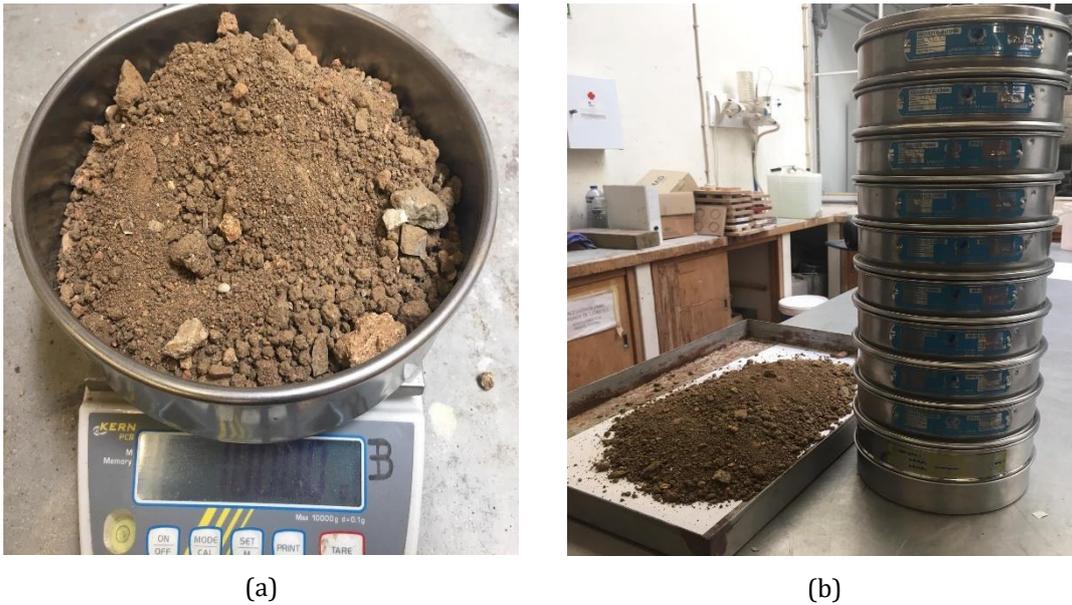


Figura 23: Realização do ensaio Análise granulométrica por via seca

3.1.1.2 Distribuição granulométrica determinada por via húmida

Este ensaio foi realizado segundo a norma LNEC E 239:1970 [53], e tem como objetivo quantificar os tamanhos das partículas do solo por via húmida.

De modo a dar início ao ensaio, separou-se uma amostra de solo com 1,767 kg. Fez-se passar a amostra pelo peneiro #10 (2 mm) (Figura 24), o material retido denomina-se por conjunto de grossos, predominantemente constituído por seixo e areia, e o material que passou designa-se por conjunto de finos, constituído principalmente por siltes e argilas, procede-se ao registo da massa que passou pelo peneiro.



Figura 24: Solo retido e passado no peneiro 10 (2 mm)

De seguida, a massa retida no peneiro #10 (2,000 mm) foi lavada com água (Figura 25-(a)) e posteriormente, secou-se o material em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até

massa constante e pesou-se e registou-se a massa do material seco e introduziu-se numa coluna de peneiros da ASTM, constituída do peneiro #1/2" (12,700 mm) até ao peneiro #10 (2 mm) (Figura 25- b), registando-se a respetiva massa retida.

Colocou-se no repartidor (Figura 25- c) o material passado no peneiro #10 (2,000 mm), até alcançar uma amostra de solo com cerca de 100 g. Após a repartição, a amostra foi lavada sobre o peneiro #200 (0,075 mm) , com intuito de desprezar as partículas mais finas. Depois, a amostra foi seca em estufa a uma temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$. Após estar seca, efetuou-se nova peneiração, numa coluna de peneiro ASTM, constituída do peneiro #20 (0,850 mm) até ao peneiro #200 (0,075 mm) (Figura 25- d), por fim, registou-se a massa retida em cada um deles.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25: Realização do ensaio Análise granulométrica por via húmida

3.1.1.3 Distribuição granulométrica determinada por ensaio de sedimentação

De modo a identificar os diferentes constituintes do solo que passou no peneiro #200 (0,075 mm), efetuou-se o ensaio de sedimentação, que seguiu a norma EN 196:1966 [54], esta determina a velocidade de queda das partículas do solo em suspensão na proveta com água através da medição do peso volúmico da suspensão a diferentes intervalos de tempo.

Primeiramente, separou-se uma amostra de solo de 1296,300 g, e dividiram-se as partículas passadas das retidas no peneiro #10 (2 mm). As partículas retidas, foram lavadas e secas em estufa, depois fez-se passar por peneiros de malha superior ao peneiro #10 (2 mm) e registou-se a massa retida em cada um deles. As partículas passadas são esquetejadas até se obter uma toma de cerca de 100 g.

Posto isto, misturou-se a toma juntamente com 100 cm³ de solução de anti-floculante e aqueceu-se durante cerca de 10 minutos (Figura 26-(a)), transferiu-se a mistura para o recipiente do agitador e com auxílio de um esguicho de água destilada retiram-se as partículas sedimentadas nas paredes do frasco (Figura 26-(b)), pôs-se o agitador em funcionamento por 15 min (Figura 26-(c)). Decorridos os 15 min, transferiu-se a mistura para um peneiro #200 (0,075mm) (Figura 26-(d)), utilizando um esguicho de água destilada de modo a transferir todos os resíduos de suspensão aderentes ao copo do agitador (Figura 26-(e)), encheu-se a proveta até à marca de 1000 cm³ com água destilada (Figura 26-(f)). O material retido no peneiro #200 (0,075mm), foi seco em estufa a uma temperatura de 105±5°C e fez-se passar na coluna de peneiros ASTM, constituída do peneiro #20 (0,85 mm) até ao peneiro #200 (0,075 mm), registando-se a respetiva massa retida.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 26: Realização do ensaio de sedimentação

De seguida, tapou-se a boca da proveta com uma rodela de borracha e agitou-se vigorosamente (Figura 27-(a)). Após esta operação, colocou-se a proveta na bancada e pôs-se o cronómetro em funcionamento, introduziu-se o densímetro na proveta até uma profundidade ligeiramente superior à posição de flutuação e deixou-se flutuar livremente. Ao fim de 1 min efetuou-se a leitura (Figura 27-(b)) e removeu-se o densímetro lentamente, que foi colocado numa proveta com água destilada à mesma temperatura. Introduziu-se o densímetro na suspensão de modo a efetuar leituras aos 2 min, 5 min, 15 min, 30 min, 60 min, 250 min, 24h e 48h.

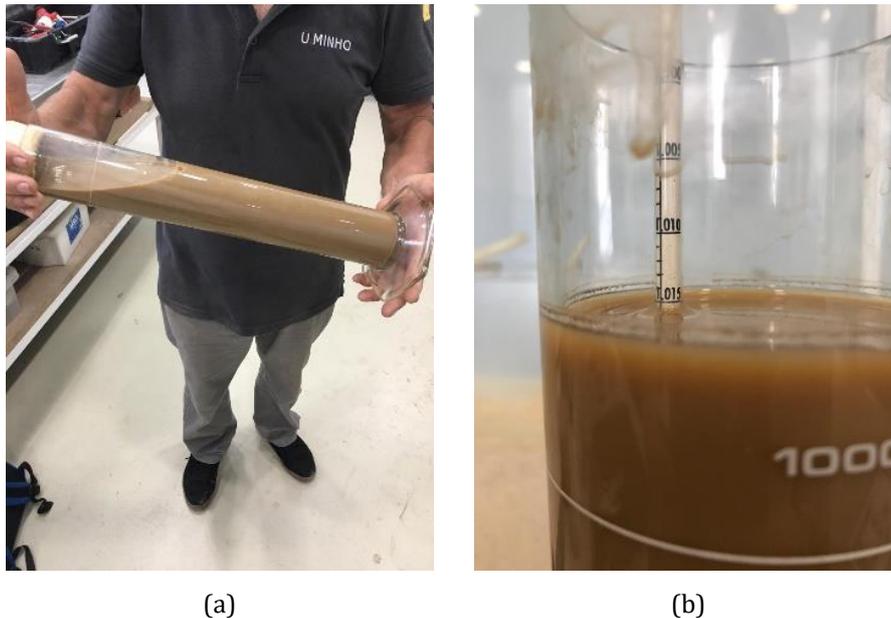


Figura 27: Finalização do ensaio de sedimentação

3.1.2 Ensaio de compactação: Proctor

O ensaio de compactação Proctor realizou-se de acordo com a especificação do LNEC E 197:1996 [55], com intuito de se determinar a relação entre o teor em água e a baridade seca dos solos. Procedeu-se a dois tipos de compactação, a compactação leve em molde pequeno (normal) e a compactação pesada em molde pequeno (normal).

3.1.2.1 Compactação leve em molde pequeno

Uma amostra, constituída por partículas inferiores a 4,76 mm, foi seca em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até massa constante. Posto isto, preparou-se uma primeira amostra com 2,300 kg de solo num tabuleiro (Figura 28-(a)) e misturou-se 2% de água (Figura 28-(b)). Foram necessárias outras amostras onde se misturou a mesma

quantidade de solo com percentagens de água crescentes com diferenças de 2% em 2%, assim sucessivamente até se atingirem 6 pontos, dos quais, quatro desses pontos se situassem abaixo do teor em água ótimo e os outros dois acima.

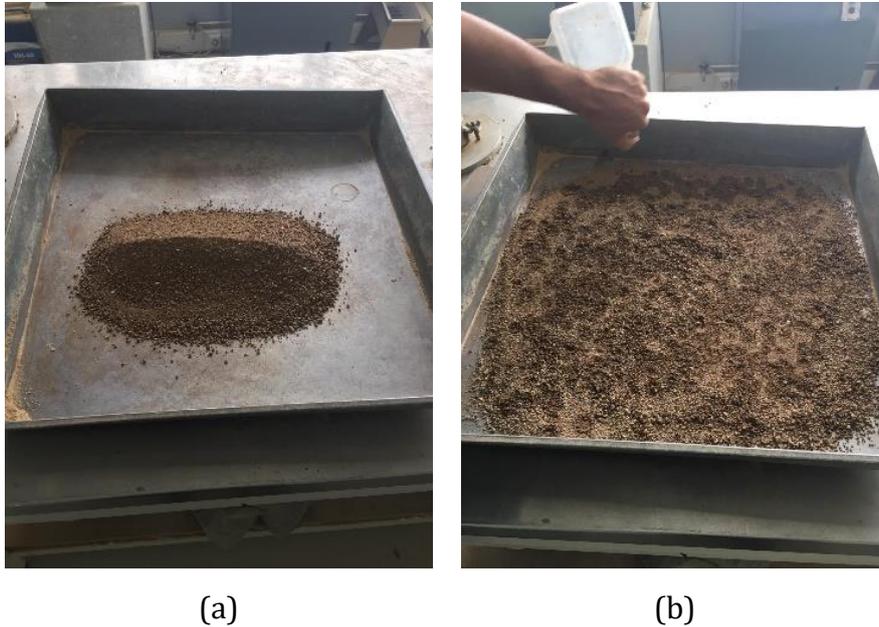


Figura 28: Mistura de água com o solo

Após a mistura, dividiu-se a amostra em três partes iguais (Figura 29-(a)), introduziu-se uma parte da amostra no molde onde foram aplicadas 25 pancadas com um pilão (Figura 29-(b)), repetiu-se o mesmo processo para as outras duas partes. De seguida, retiraram-se o excesso de amostra do molde (Figura 29-(c)) e procedeu-se a sua pesagem (Figura 29-(d)). Depois retirou-se duas amostras de solo de cada uma das extremidades do molde (Figura 29-(e,f)), com cerca de 2 cm de profundidade, colocadas em cápsulas de modo a determinar o teor em água.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 29: Realização do ensaio de compactação leve em molde pequeno

3.1.2.2 Compactação pesada em molde pequeno

O processo de compactação pesada em molde pequeno é idêntico ao da compactação leve em molde pequeno, diferenciando apenas na divisão da amostra e no tipo de compactação. Primeiramente, preparou-se 2,300 kg de amostra de solo que passou no peneiro #4 (4,760 mm) e colocou-se num tabuleiro, seguidamente acrescentou-se 2% de água, misturou-se e repartiu-se a amostra em cinco partes iguais (Figura 30-(a)), seguidamente colocou-se uma parte da amostra no molde e com recurso a um compactador mecânico (Figura 30-(b)), foram aplicadas 25 pancadas, introduziu-se outra parte da amostra e compactou-se. Repetiu-se este processo até compactar todas as cinco partes da amostra. Após a compactação, retirou-se o excesso do molde e pesou-se. De seguida, retiraram-se duas amostras de solo de cada uma das extremidades do molde e colocaram-se em cápsulas para determinar o teor em água.

Repetiu-se o procedimento até se atingirem 6 pontos, provenientes das diferentes misturas, dos quais, quatro desses pontos se situam abaixo do teor em água ótimo e os outros dois acima.



(a)



(b)

Figura 30: Etapas que diferenciam compactação pesada da compactação leve

3.1.3 Limites de Consistência

Os limites de consistência foram calculados segundo a norma EN 143: 1969 [56], onde se prevê os limites de liquidez e os limites de plasticidade, para as amostras de solo. Estes limites permitem determinar a variação do teor de água nos diferentes estados do solo. Para dar início aos ensaios retiraram-se amostras de solo que passaram no peneiro #40 (0,425 mm), que são constituídos por silte e argila (solos finos).

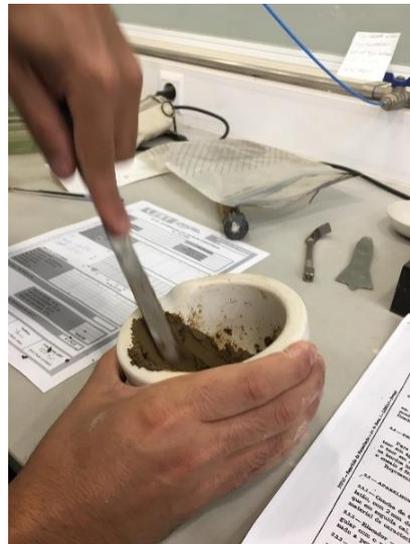
3.1.3.1 Limite de Liquidez

O limite de liquidez de uma amostra do solo corresponde ao teor de água a 25 pancadas na concha de Casagrande, obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor de água de cada um dos 4 provetes da amostra com o número de pancadas.

Inicialmente, retirou-se 100 g de amostra de solo que passaram no peneiro #40 (0,425 mm), e colocou-se a amostra dentro de um almofariz (Figura 31-(a)), tendo sido amassada à espátula com água destilada até se formar uma pasta homogênea e consistente (Figura 31-(b)). Sempre que se adicionava uma nova porção de água, envolvia-se a mistura durante pelo menos 5 minutos.



(a)



(b)

Figura 31: Amostra no almofariz

Após a amassadura, tomou-se uma porção de pasta preparada e colocou-se na concha Casagrande, de modo que se obtivesse uma camada de superfície nivelada, não muito

comprimida e com uma espessura de 1 cm. Com auxílio de um riscador (Figura 32-(a)), fez-se um sulco aberto no provete (Figura 32-(b)). De seguida, colocou-se a concha de Casagrande em funcionamento, sendo aplicadas pancadas. Considera-se o ensaio por terminado quando o solo entre em contacto pela parte inferior do sulco numa extensão de cerca de 1 cm, anotando o número de pancadas correspondentes. Posteriormente, retirou-se com a ponta da espátula, cerca de 10 g de amostra da zona do sulco em que se deu a união (Figura 33-(a)). Colocando a amostra numa cápsula de alumínio (Figura 33-(b)), onde foi registada a sua massa, posto isto, a cápsula foi inserida numa estufa até a variação da massa ser inferior a 0,1% entre medições consecutivas, para ser pesado e proceder à determinação do seu teor em água.

À pasta anteriormente obtida, foram adicionadas novas porções de água destilada com objetivo de obter provetes com teores de água diferentes, de modo a que o número de pancadas necessárias para unir os bordos dos sulcos varie entre 10 a 40, dos quais, dois ensaios dessem acima das 25 pancadas e dois abaixo. Através de uma interpolação destes valores, determinou-se o teor em humidade correspondente a 25 pancadas, que correspondeu ao limite de liquidez da amostra ensaiada.

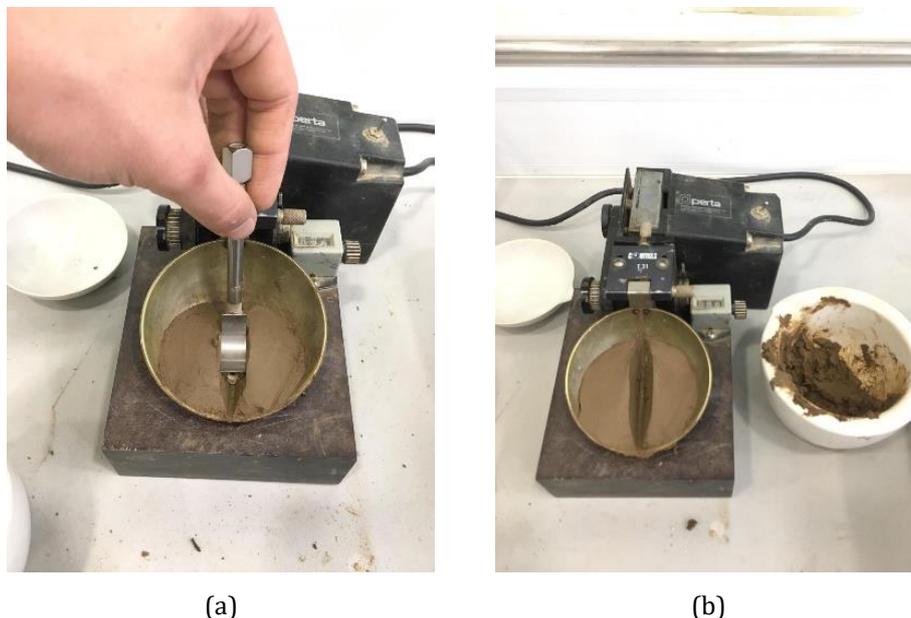


Figura 32: Sulco aberto na concha de Casagrande

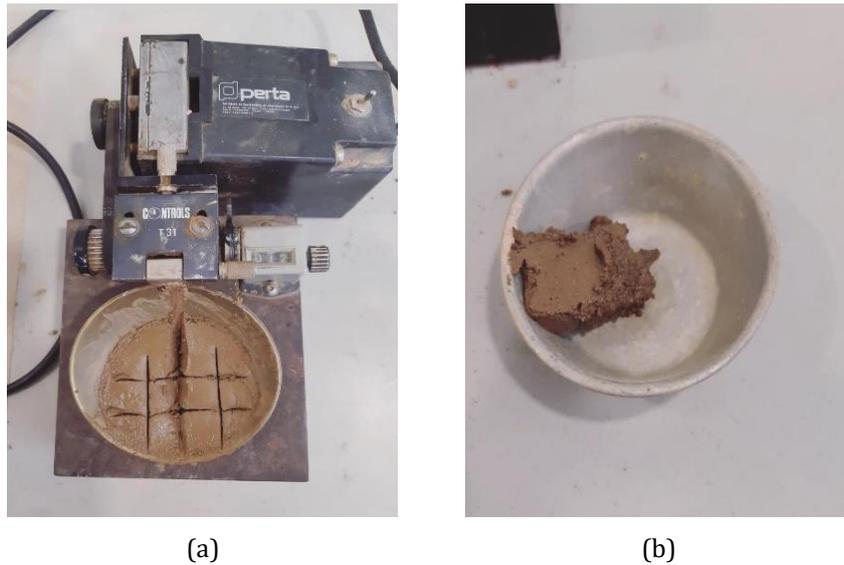


Figura 33: Amostra do ensaio da concha de Casagrande

3.1.3.2 Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade de uma amostra de solo corresponde ao valor médio dos teores em água determinados em 4 provetes de ensaio.

Da amostra do solo utilizada no ensaio de limite de liquidez, retirou-se 20 g que se amassaram à espátula com água destilada, até se obter uma massa que seja suficientemente plástica de modo a permitir moldar com facilidade quatro pequenas esferas de diâmetro sensivelmente iguais. Seguidamente, rolaram-se as esferas sobre uma placa de vidro, com pressão suficiente para transformar num filamento cilíndrico (Figura 34). O ensaio é considerado válido quando se dê a rotura do filamento e quando o seu diâmetro atinga cerca de 3 mm (Figura 35). Se ocorrer rotura quando o filamento apresenta diâmetro maior que 3 mm, adiciona-se mais água à mistura. Caso o filamento chegue aos 3 mm e não apresentar sinais de rotura, volta-se a formar a esfera e rola-se de novo, continuando esta operação até que devido à progressiva secagem do provete, se dê a rotura do filamento, com cerca de 3 mm de diâmetro. Repetiu-se este processo até se obterem quatro provetes.

Após a rotura do filamento, com cerca de 3 mm de diâmetro, colocou-se os provetes em cápsulas de alumínio e pesou-se. As cápsulas foram colocadas numa estufa até se obter uma massa constante, avaliada por sucessivas pesagens.



Figura 34: Realização do ensaio limite de plasticidade



Figura 35: Rotura do filamento

3.1.4 Determinação do teor de finos através do ensaio de Azul de Metileno

O ensaio azul de metileno permite quantificar a quantidade de argila presente numa amostra de solo, através da troca iónica entre os catiões existentes nas partículas do solo e foi realizado de acordo a norma EN 933-9:2002 [57].

A amostra utilizada, foi peneirada num peneiro #10 (2 mm), obtendo-se aproximadamente 60 g de solo. Colocou-se a amostra num gobelé (Figura 36-(a)) e acrescentou-se 500 ml de água destilada. Com um misturador mecânico, regulou-se uma velocidade de 600 rotações por min e posicionou-se a ventoinha a cerca de 10 mm acima da base do gobelé e procedeu-se à agitação (Figura 36-(b)), durante 5 min, após esse período deixou-se repousar mais 5 min.

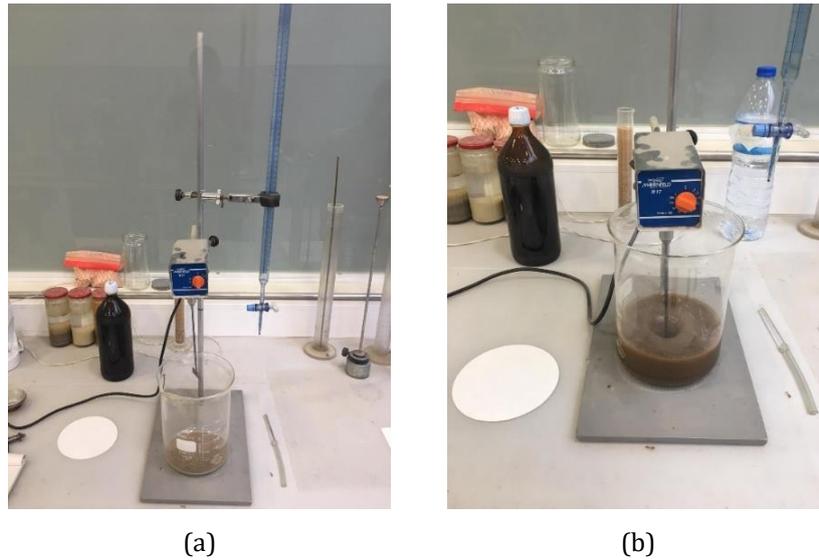


Figura 36: Agitar a mistura

Posteriormente, injetou-se 5 ml de azul de metileno no gobelé com recurso a uma bureta (Figura 37-(a)), agitou-se durante 1 min e efetuou-se o ensaio da mancha que consiste em retirar uma gota de suspensão com a ajuda de um conta-gotas e deposita-la sobre o papel de filtro, formando uma mancha azul rodeada com uma zona húmida incolor. Voltou-se a adicionar mais 5 ml de azul de metileno e repetiu-se todo o processo (Figura 37-(b)) até que a mancha azul fosse rodeada por uma mancha de azul claro com cerca de 1 mm de espessura, designada por auréola. O ensaio terminou, quando se verificou que a auréola se mantinha ao longo de cinco gotas com diferenças de um minuto entre elas (Figura 38).

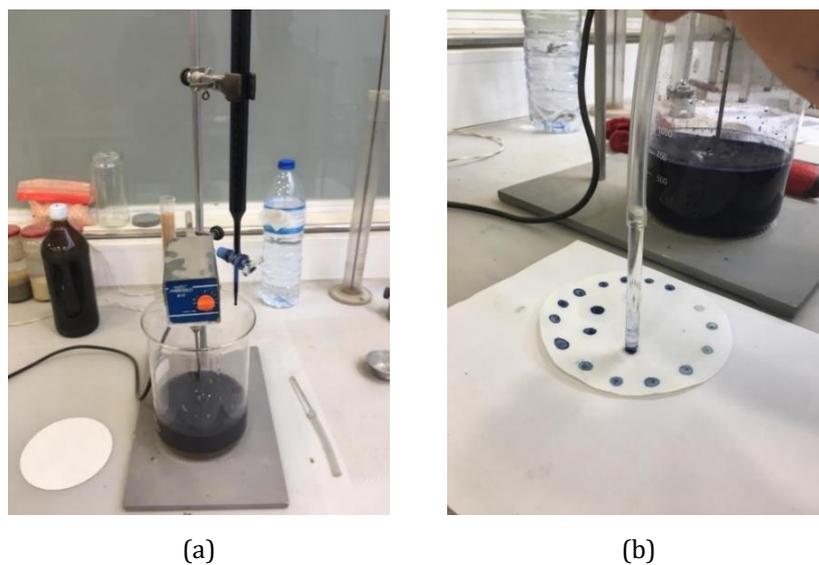


Figura 37: Realização do ensaio azul de metileno

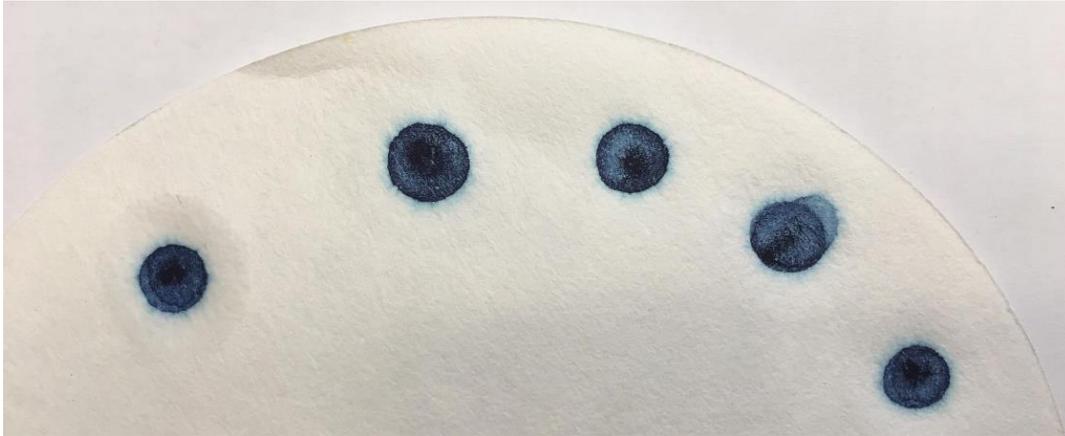


Figura 38: Cinco auréolas consecutivas

3.1.5 Equivalente de areia

Este ensaio tem como objetivo estimar a percentagem de areia existente numa fração de solo com partículas de dimensão inferior a 2 mm.

Realizou-se o ensaio de acordo com norma EN 933-8:2002 [58], assim, colocou-se solução até à marca inferior nos dois provetes cilíndricos (Figura 39-(a)) e adicionaram-se amostras de solo com aproximadamente 120 g em cada um deles (Figura 39-(b)).



(a)



(b)

Figura 39: Misturar a amostra com a solução

De seguida, através de ligeiras pancadas com a palma da mão na parte inferior do provete, retirou-se o ar existente (Figura 40-(a)). Aguardaram-se aproximadamente 10 min para deixar repousar (Figura 40-(b)).



(a)



(b)

Figura 40: Repouso da mistura

Com auxílio de uma máquina manual, que contém uma roldana que faz o provete mover-se na horizontal, agitou-se aproximadamente 90 ciclos em 30 s (Figura 41). Após agitar o provete, procedeu-se à lavagem das paredes com um esguicho que continha água destilada, enchendo até à marca superior do provete (Figura 42-(a)). Aguardaram-se mais 20 min para efetuar a leitura do valor do equivalente de areia (Figura 42-(b)).

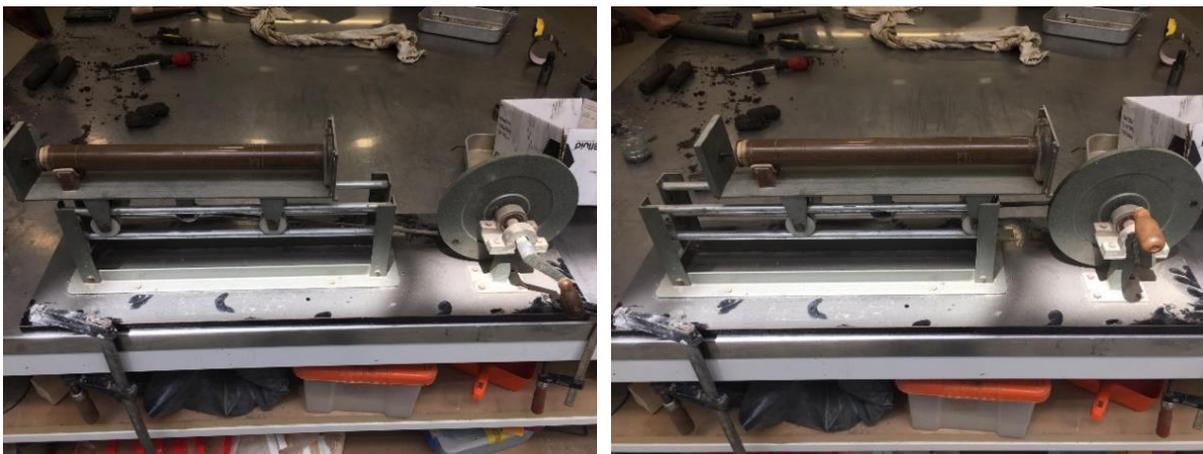


Figura 41: Agitar a mistura com auxílio de uma máquina manual

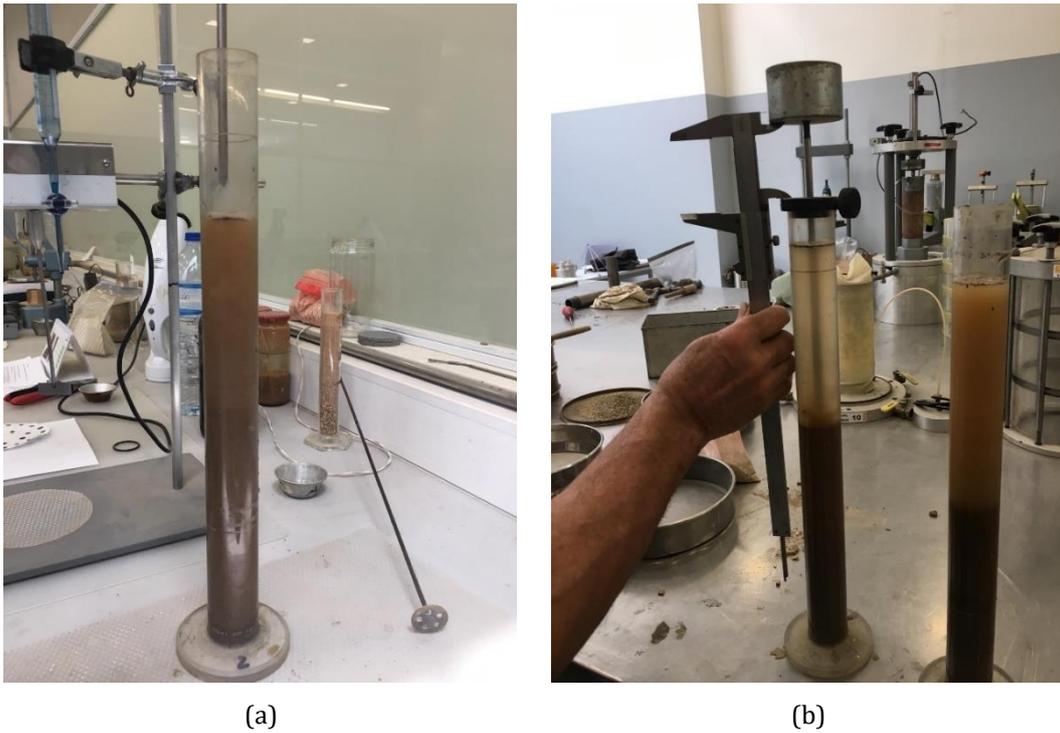


Figura 42: Finalização do ensaio de equivalente de areia

O valor do equivalente de areia obtém-se recorrendo à (Equação 1 (Figura 43):

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- SE- equivalente de areia [g];
- h_1 - altura desde a base da proveta até à superfície floculada [cm];
- h_2 - altura desde a face inferior do mergulhador até à face superior [cm].

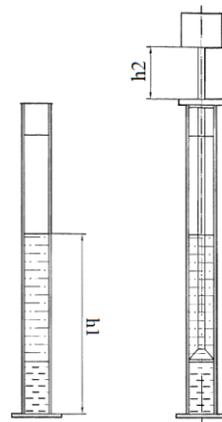


Figura 43: Finalização do ensaio equivalente de areia [58]

3.2 Caracterização dos Blocos de Terra Comprimida (BTC)

Foram caracterizados blocos de terra comprimida usados na construção total ou parcial de edifícios em terra, com intuito de se perceber as suas propriedades físicas e mecânicas e a sua durabilidade. Estes blocos foram cedidos pela empresa “Betão e Taipa” já curados e preparados para ser utilizados em obra, e são compostos por 6% de cal hidráulica, 1% de cal hidratada, 10% de água e o restante é constituído por solo (caracterizado anteriormente).

3.2.1 Determinação do teor de humidade por secagem ao ar

Os blocos de terra comprimida quando chegaram ao laboratório apresentavam elevados índices de humidade (Figura 44-(a)), foram secos de forma uniforme (Figura 44-(b)). O seu teor de humidade foi sendo determinado ao longo do período de secagem, tendo-se considerado que os provetes estavam secos quando apresentavam uma diferença menor do que 0,1% de perda de massa.

O teor de humidade é obtido através da (Equação 2).

$$h = \frac{Mh - M}{M} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- h - teor de humidade [%];
- Mh - massa do provete húmido [g];
- M - massa do provete seco [g];



(a)



(b)

Figura 44: Realização do ensaio de humidade por secagem do ar

3.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo a EN 772-1:2011 [59]. Este ensaio foi efetuado com recurso a uma prensa hidráulica de quatro colunas (Bastidor E8) de capacidade até 3000 kN, acoplado a um sistema de controlo hidráulico designado por Sentur (Figura 45-(a)). Foram ensaiados seis provetes de BTC. Antes de começar o ensaio foram registadas as respetivas massas e dimensões (Figura 45-(b)).



(a)



(b)

Figura 45: Equipamentos e provetes para elaboração do ensaio de resistência à compressão

Para dar início ao ensaio, colocou-se na base do pórtico pratos metálicos lisos que servem de apoio em altura à prensa, onde os blocos são colocados no centro do prato metálico quadrado com dimensões superiores às do bloco.

De modo a possibilitar uma carga uniformemente distribuída e evitar excentricidades, na face superior do bloco foram colocadas peças metálicas lisas com as dimensões do bloco, no qual na parte superior das peças também foi colocada uma rótula para que uniformize a distribuição de esforços (Figura 46).

No ensaio recorreu-se a dois transdutores, um pertencente à prensa e outro exterior, para medição do deslocamento vertical (LVDTs). Durante o ensaio efetuou-se um controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,5 kN/s. Após o pórtico estar montado, ensaiou-se um provete de cada vez, os provetes foram ensaiados até o valor de carregamento, após pico, atingir 40 a 50 % do valor da rotura, onde se obteve a curva de deformação. Entre cada ensaio limpavam-se todas as chapas para que não ocorresse interferência com o ensaio seguinte.



Figura 46: Pórtico do ensaio á compressão

3.2.3 Resistividade elétrica

Este ensaio foi executado com recurso ao equipamento “Resipod Proced” (Figura 47), composto por quatro elétrodos alinhados e equidistantes (38 mm), onde uma corrente elétrica é aplicada entre os dois elétrodos externos e medida a diferença de potencial entre os dois elétrodos internos. Através desses parâmetros é determinada a resistância elétrica.



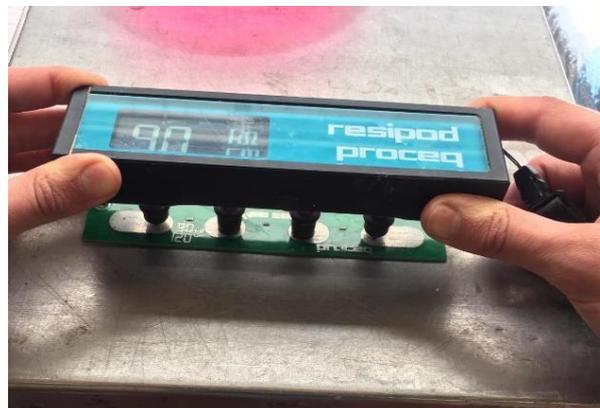
Figura 47: Equipamento “Resipod Proceq”

Foram ensaiados três provetes de blocos de terra comprimida, no estado de saturados. Antes de se utilizar o equipamento é necessário garantir que os eléctodos estejam sempre molhados e, para tal, recorreu-se a um recipiente com água (Figura 48-(a)).

Para dar início ao ensaio, procedeu-se à calibração do equipamento recorrendo à régua de calibração do mesmo (Figura 48-(a,b)).



(a)



(b)

Figura 48: Calibração do equipamento

De seguida, imergiram-se as pontas dos eléctodos e encostaram-se as mesmas nas diferentes faces dos blocos (Figura 49). Repetiram-se as medições três vezes por face do provete. A resistividade eléctrica foi medida de acordo com a lei de Ohm.



Figura 49: Eléttodos nas diferentes faces

3.2.4 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de ultrassons consiste na determinação da velocidade de propagação do som, que é determinada através da medição do tempo que um determinado impulso sonoro demora entre o transdutor emissor e o transdutor recetor. Quanto maiores forem as diferenças entre a velocidade de propagação de vários pontos do mesmo provete, maior a probabilidade de existirem defeitos na homogeneidade, compacidade e presença de fissuras. De notar que um impulso sonoro, propaga-se com menor velocidade num meio poroso e com maior velocidade num meio mais denso.

O ensaio realizou-se de acordo com a norma EN 12504-4:2007 [60], sendo utilizado o equipamento “Procer”, modelo “Pundite lab” (Figura 50-(a)) e recorreu-se ao método direto e indireto. De modo a dar início ao ensaio efetuou-se a calibração do aparelho recorrendo-se a um cilindro em que o tempo de propagação era previamente conhecido (Figura 50-(b)). De seguida, procedeu-se à medição através do método direto e indireto. O método direto consiste em colocar o recetor e emissor em faces opostas dos blocos, efetuando-se três medições por bloco (Figura 50-(c)). Enquanto que o método indireto consiste na colocação do recetor e emissor em faces adjacentes dos blocos, efetuando-se também três medições por bloco (Figura 50-(d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 50: Realização do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons (a) equipamento “Procer”, b) calibração, c) método direto, d) método indireto)

A velocidade de propagação dos ultrassons é obtida através da (Equação 3:

$$V_{\mu s} = \frac{L}{t} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

- $V_{\mu s}$ - velocidade de propagação de ultrassons [mm/ μs];
- L- distância entre o emissor e o recetor [mm];
- t- tempo de propagação de ultrassons [μs];

3.2.5 Absorção de água por imersão

Este ensaio permite determinar a diferença entre a massa do provete imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco. Através dessa diferença consegue-se determinar a porosidade aberta do provete.

O ensaio seguiu a Especificação LNEC E 394:1993 [61]. Para realização deste ensaio colocaram-se três provetes numa sala condicionada à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e procedeu-se ao registo das suas massas, de modo a determinar a sua humidade (Figura 51-(a)).

De seguida, introduziram-se os provetes num recipiente com fundo, que continha uma rede plástica (Figura 51-(b)), uma vez que esta evita que a face inferior dos provetes entrem em contacto direto com o fundo do recipiente, proporcionando um maior contacto com a água. Acrescentou-se água até 1/3 da altura do provete (Figura 52-(a)), à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e passado uma hora, acrescentou-se mais água até 2/3 da altura do provete (Figura 52-(b)). Finalizada outra hora, acrescentou-se água até à totalidade da sua altura, onde o nível final da água não deve ultrapassar 20 mm da face superior do provete.



(a)



(b)

Figura 51: Fase inicial do ensaio de imersão

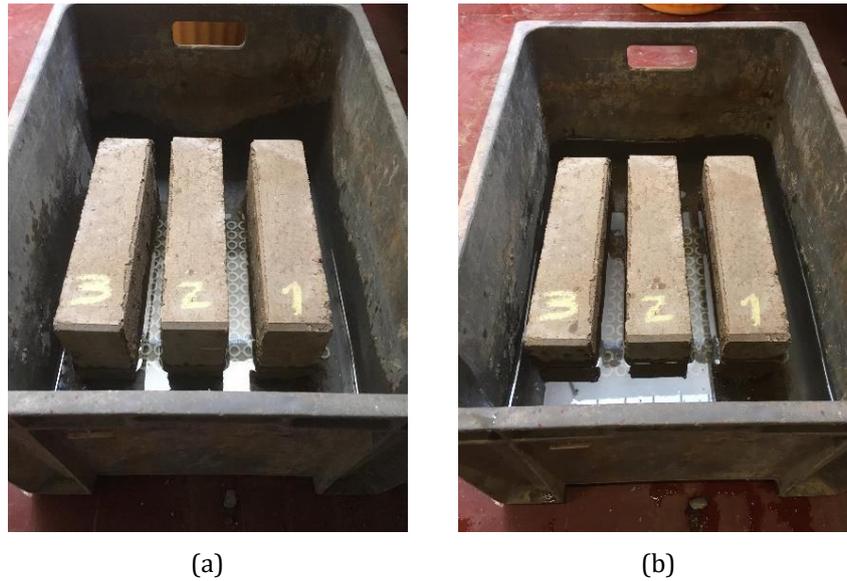


Figura 52: Adicionar água ao recipiente

Após pelo menos 24 h, os provetes foram removidos e limpou-se a o excesso de água superficial, para posteriormente, serem pesados e registada a sua massa. Voltou-se a submergir os provetes por mais 24 h. Considerou-se alcançada a massa constante do provete saturado quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, com intervalos de pelo menos 24 h, foi inferior a 0,1% da média de duas leituras consecutivas.

A absorção de água por imersão é obtida segundo (Equação 4:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

- m_1 - massa do provete saturado no ar [g];
- m_2 - massa hidrostática do provete saturado [g];
- m_3 - massa do provete seco [g];

Contudo, este ensaio não deu para terminar como rege a norma, pois a massa dos provetes não estava sempre a aumentar ao ficar saturado, os provetes com o passar do tempo dentro de água iam-se deteriorando, acabando por perder massa (Figura 53-(a)). Posto isto, fez-se um novo ensaio de imersão, como já se sabia que os provetes não resistiam após 24 h, fez-se os mesmos procedimentos como rege a norma, só que com a diferença dos tempos de leitura, que foram ao fim de 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, dentro (Figura 53-(b)) e fora de água.

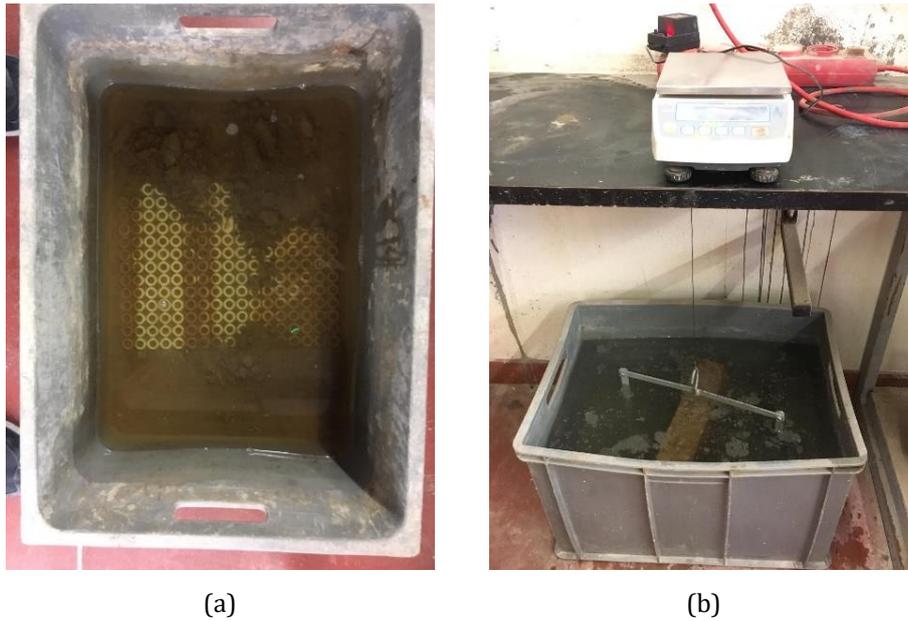


Figura 53: Ensaio de absorção de água por imersão, sendo possível constatar a perda de massa dos blocos por desagregação durante o processo de imersão

3.2.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade acontece devido à diferença de pressões entre a superfície livre de água em contacto com o provete e a superfície de água nos vasos capilares. O ensaio realizou-se de acordo a Especificação LNEC E 393:1993 [62]. Inicialmente, procedeu-se à secagem dos três provetes de blocos de terra comprimida, durante 14 dias numa estufa à temperatura regulada de $60 \pm 5^\circ\text{C}$. Após este período, colocaram-se os provetes a arrefecer até ficarem à temperatura ambiente no interior do laboratório, e conseqüentemente registar a respetiva massa.

De seguida, colocou-se uma rede plástica no fundo do recipiente (Figura 54-(a)), de modo a evitar o contacto direto entre a parte inferior do provete e o recipiente. Introduziram-se os provetes dentro do reservatório (Figura 54-(b)) e encheu-se cuidadosamente o reservatório com água até 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete, mantendo o nível de água constante (Figura 54-(c)).



(a)



(b)



(c)

Figura 54: Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade

Posteriormente, para efetuar as medições, retirou-se o provete do reservatório, deixando a água escorrer por si, colocando-o sobre uma base não absorvente de modo a retirar a água superficial. De seguida, procedeu-se ao registo das massas dos provetes húmidos, ao fim de tempos iguais a 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 minutos e 2, 3, 4, 6, 24, 72 horas. Após cada pesagem foi colocado imediatamente o provete dentro do reservatório. Foram também registadas, para os diferentes provetes, as alturas de água absorvida por capilaridade no tempo de medição (t_i) igual a 30, 60 min e 2, 4, 6, 24, 72 horas.

A absorção por capilaridade é obtida através da Equação 5:

$$A_c = \frac{M_i - M_o}{A_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

- M_i - massa do provete no tempo t_i [g];
- M_o - massa do provete seco [g];
- A_i - área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água [mm];

3.2.7 Estudo da Durabilidade através do ensaio de erosão à chuva

Este ensaio permite determinar a degradação de uma face do bloco, provocado pela queda de água, com intuito de verificar a resistência superficial à erosão, avaliando deste modo a durabilidade do bloco.

O ensaio realizou-se de acordo com a norma NZS 4298:1998 [63], tendo-se recorrido a um simulador de chuva (

Figura 55) para o ensaio de erosão. Os parâmetros climatológicos aplicados foram os da região das Penhas Douradas, distrito de Guarda, pois é a região em Portugal onde foram verificados maiores valores de precipitação anual (1715 mm) e de índice de exposição a chuvas dirigidas. Através deste índice é obtido o valor do caudal de 14,26 l/min, que foi o caudal utilizado na simulação da queda de chuva.

O valor da pressão de saída da água do bico foi de 45 kPa, foi escolhido consoante os valores adotados para testes de erosão referenciados pelas normas internacionais [64].

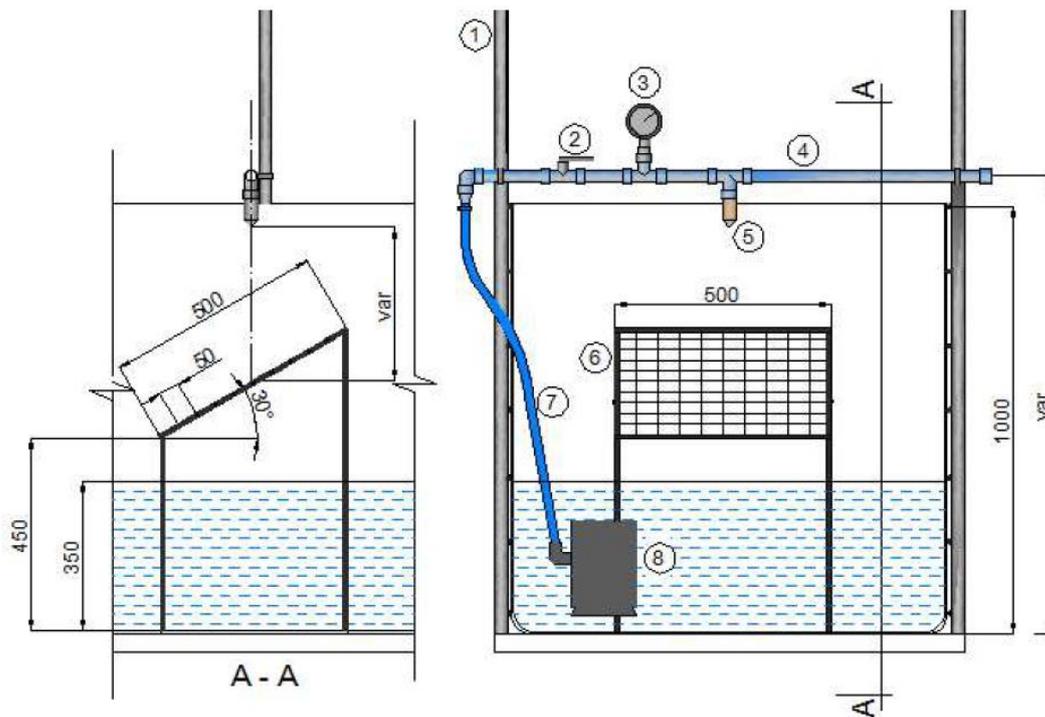


Figura 55: Simulador de chuvas para teste de degradação [mm] [64]

Os autores [64] criaram um simulador de chuvas com objetivo principal de apresentar uma metodologia simples e de fácil aplicação, e de modo a que o teste possa ser adaptado a diferentes características pluviais. Recorreram a uma revisão de outros simuladores de chuva já publicados, também considerando as observações de outros autores. O simulador desenvolvido é constituído por:

- 1- Estrutura vertical com apoio em tubos de PVC rígidos ($\varnothing 1''$) composta de dois apoios verticais fixados no tanque de teste;
- 2- Válvula de passagem;
- 3- Medidor de pressão (capacidade máxima de 600 kPa);
- 4- Tubulação horizontal para a água em tudo de PVC rígido ($\varnothing 1''$), fixo nos apoios verticais através de braçadeiras que permitem variar a distância de aplicação do jato. Os tubos possuem o mesmo diâmetro de modo a evitar a perda de pressão entre as ligações;
- 5- Bico – Full Cone Spray-HH30-30100, com abertura de saída de 6,3mm, fabricado pela Spraying Systems e posicionado no centro;
- 6- Plataforma de apoio para os provetes em cantoneiras em aço inox (10 mm x 10 mm) e malha vazada (50 mm x 50 mm) de maneira a permitir o escoamento de

água. Foi adicionada uma peça regulável para evitar o deslocamento do provete devido à inclinação da mesa de apoio;

- 7- Bomba submersa, onde o nível mínimo de água foi estabelecido em função do desempenho da bomba;
- 8- Mangueira flexível ($\varnothing 1''$).

Primeiramente procedeu-se a pesagem dos provetes e posteriormente colocaram-se os blocos, um de cada vez, sobre uma plataforma de apoio (Figura 56-(a,b)), com uma inclinação de 30° e uma distância do bico de 320 mm. Posto isto, efetuou-se a simulação da queda da chuva por um tempo de exposição de 2 horas (Figura 56-(c,d)). Foram ensaiados 7 provetes, inicialmente estavam previstos serem ensaiados 6 provetes mas um deles ficou muito degradado, e assim optou-se por se ensaiar um novo provete.

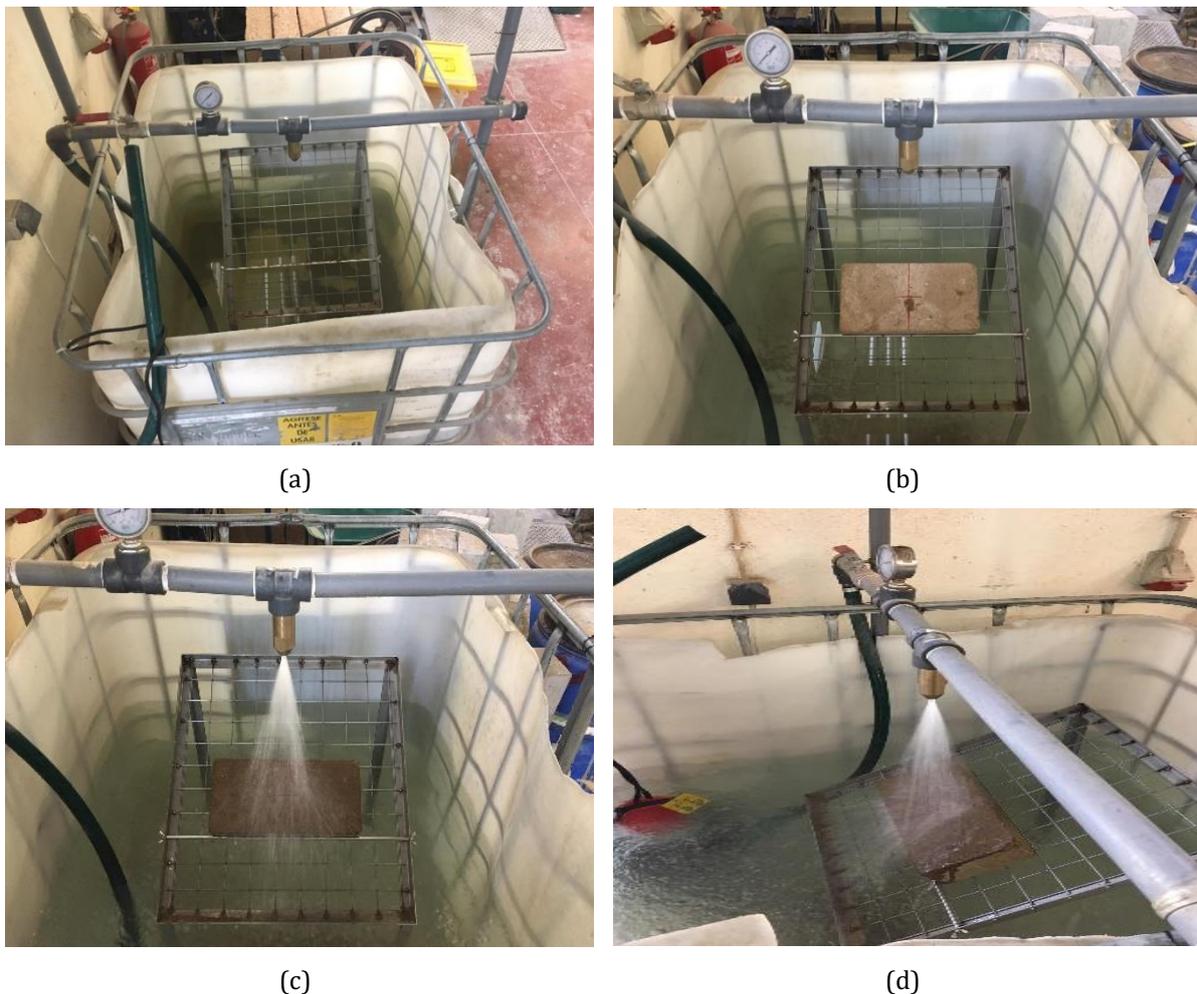


Figura 56: Realização do ensaio de erosão à chuva

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão de Resultados

Ao longo deste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de toda a campanha experimental descrita no capítulo 3, relativamente à caracterização do solo utilizado para a produção dos BTC e à caracterização dos próprios BTC.

4.1 Caracterização do solo

Neste subcapítulo irão ser apresentados os resultados da caracterização do solo e, conseqüentemente, a análise e interpretação dos mesmos. Através desses resultados é possível determinar se o solo é adequado para ser utilizado no fabrico dos BTC.

4.1.1 Distribuição Granulométrica das Partículas de Solo

A distribuição granulométrica das partículas de solo foi determinada por crivagem por via seca e via húmida e por um teste com sedimentação (de modo a determinar a granulometria do solo passado no peneiro #200 (0,075 mm)).

4.1.1.1 Distribuição granulométrica determinada por via seca

Os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica por via seca são apresentados na Tabela 8 e na Figura 57. Para este ensaio foram utilizadas duas amostras com cerca de 1 kg cada, e registada a massa retida em cada peneiro, conforme descrito no subcapítulo 3.2.1.1.

Tabela 8: Resultados da análise granulométrica por via seca

Tipo de material	Fração	Solo (%)
Seixo grosso	60 a 20 mm	2,79
Seixo médio	20 a 6 mm	18,49
Seixo fino	6 a 2 mm	32,34
Areia grossa	2 a 0,6 mm	18,77
Areia média	0,6 a 0,2 mm	22,28
Areia fina	0,2 a 0,06 mm	4,49
Silte e argila	< 0,06 mm	0,85

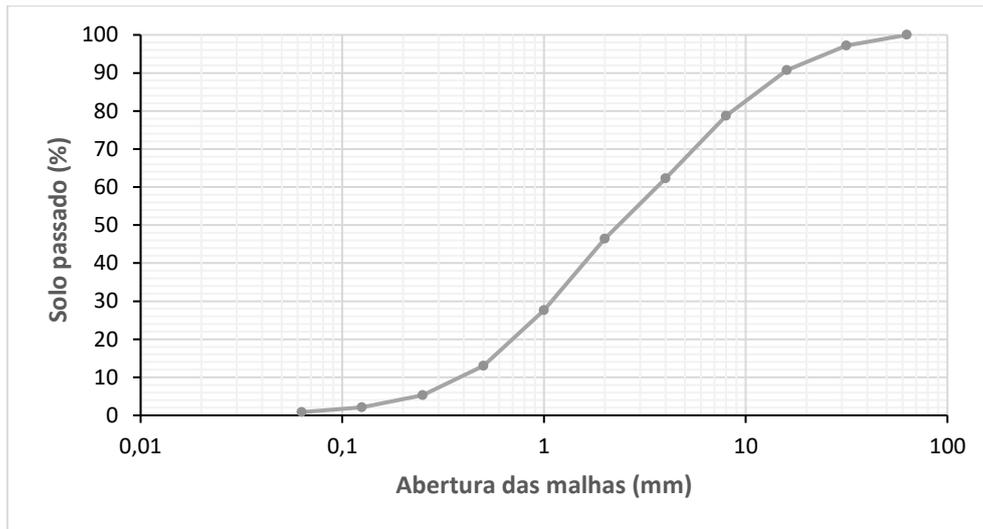


Figura 57: Distribuição cumulativa dos tamanhos de partícula do solo determinada por análise granulométrica por via seca

O solo apresentou uma curva granulométrica contínua com boa distribuição de grãos, como apresentado na Figura 57 e Figura 58. Porém, segundo os padrões ARS 680:1996 [50], esta granulometria não se encontra dentro da área recomendada (na maioria dos casos fornecem resultados recomendados). No entanto, estes padrões referem também que o tipo de solo cuja composição não se encontre dentro da área sombreada ainda pode dar resultados aceitáveis sendo, no entanto, recomendado que solos nestas condições sejam submetidos a uma série de testes que permitam avaliar a sua adequação.

O solo caracterizado, determinado por análise granulométrica por via seca apresenta na sua composição 53,51 % de seixo, 45,54 % de areia e 0,85 % de silte e argila (Tabela 8).



Figura 58: Foto do resultado do ensaio de análise granulométrica por via seca

4.1.1.2 Distribuição granulométrica determinada por via húmida

A diferença entre o ensaio de análise granulométrica por via húmida em comparação com a via seca, consiste na lavagem do solo sobre um peneiro, que através de um fluxo de água facilita a passagem de sedimentos pelas malhas, sem aplicar força externa, a água lava os grãos auxiliando a sua desagregação de partículas finas, evitando deste modo, que sejam quantificados agregados com diâmetros superiores aos reais [65,66].

Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos para a distribuição granulométrica por via húmida e na Figura 59 está representada a respetiva curva granulométrica.

Tabela 9: Resultados da análise granulométrica por via húmida

Tipo de material	Fração	Solo (%)
Seixo grosso	60 a 20 mm	
Seixo médio	20 a 6 mm	3,00
Seixo fino	6 a 2 mm	6,10
Areia grossa	2 a 0,6 mm	11,50
Areia média	0,6 a 0,2 mm	26,20
Areia fina	0,2 a 0,06 mm	14,30
Silte e argila	< 0,06 mm	38,90

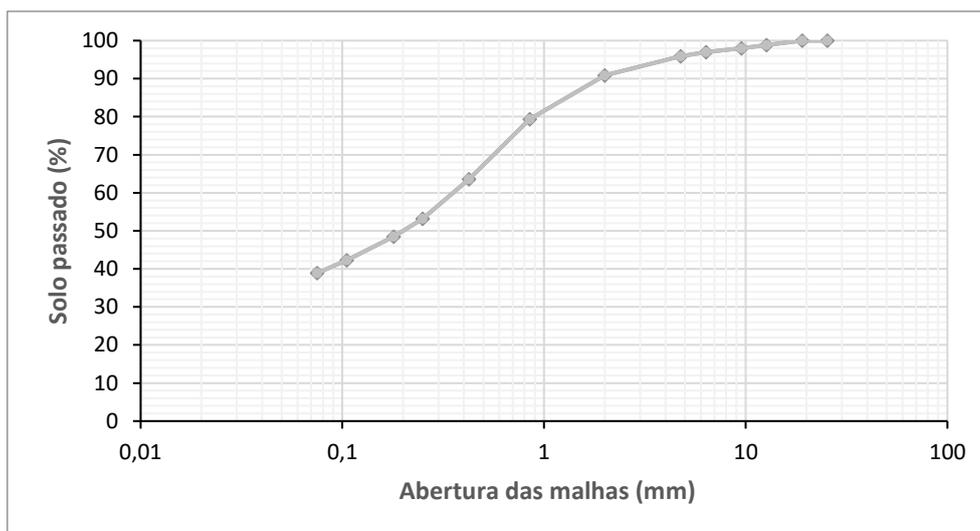


Figura 59: Distribuição cumulativa dos tamanhos de partículas do solo, determinada por análise granulométrica por via húmida

O solo caracterizado, determinado por análise granulométrica por via húmida, é composto por 9,10% de seixo, 52% de areia e 38,9% de silte e argila. É perceptível que a curva granulométrica por via húmida apresenta maior percentagem de partículas finas, o que já era de esperar, uma vez que o solo foi submetido à lavagem efetuada antes da peneiração. Também apresentava uma curva continua com boa distribuição dos diferentes grãos. E desta vez, a granulométrica já se encontrava dentro da área recomendada nos padrões ARS 680:1996 [50].

4.1.1.3 Distribuição granulométrica determinada por ensaio de sedimentação

A determinação da distribuição granulométrica através de um ensaio de sedimentação permite determinar a percentagem de silte e argila presente no solo. Na Figura 60 é apresentada a curva granulométrica obtida para uma amostra do solo e conclui-se que este apresenta uma granulometria extensa com boa distribuição dos grãos (Tabela 10), pois estão presentes os quatro tipos de grãos (15,9% seixo, 47,2% de areia, 17,6% silte e 19,35% de argila) em percentagens significativas. Esta curva granulométrica é similar à determinada por análise granulométrica por via húmida, pois o ensaio de sedimentação também é por via húmida, daí os resultados serem idênticos.

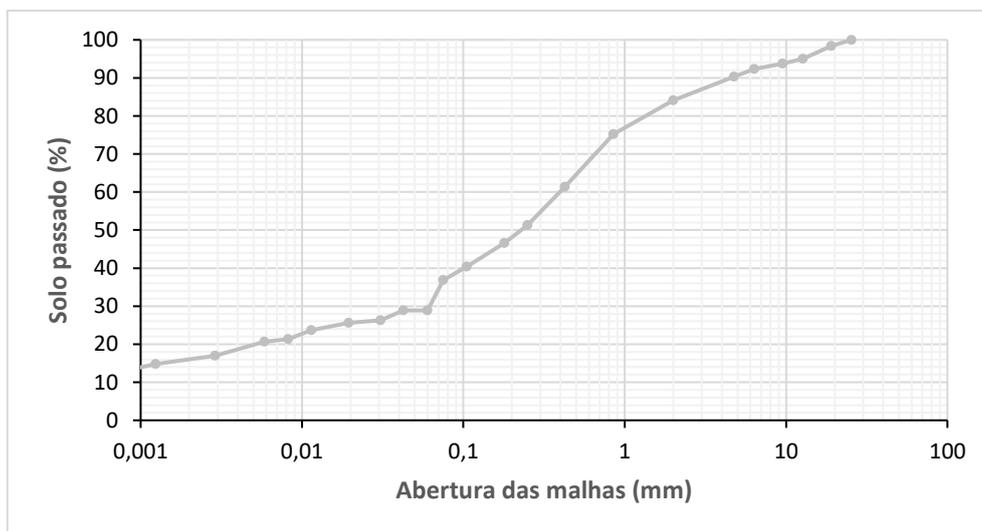


Figura 60 Distribuição cumulativa dos tamanhos de partícula do solo determinada por ensaio de sedimentação

Tabela 10: Resultados da análise granulométrica com sedimentação

Tipo de material	Fração	Solo (%)
Seixo	60 a 2 mm	15,9
Areia	2 a 0,06 mm	47,2
Silte	0,06 a 0,002 mm	17,6
Argila	<0,002 mm	19,35

Ao analisar a Tabela 10, percebe-se que o solo estudado, apresenta a composição granulométrica adequada para a fabricação de BTC, pois esta distribuição respeita todos os limites propostos pelas normas de diferentes países, que estão apresentados na Tabela 6.

Segundo a norma NBR 15575:2013 [67] todo o solo para fabrico de BTC tem de passar num peneiro nº 4 (4,75 mm), de modo a controlar a dimensão e percentagem de seixo existente, para não prejudicar a resistência, também refere que a percentagem de passados no peneiro nº200 (0,075 mm) tem de ser de 10 a 50% [68]. No solo caracterizado, a percentagem de passados no peneiro nº 200 é de 36,9%, respeitando o intervalo referente na norma.

4.1.2 Ensaio de compactação: Proctor

Os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor, tanto da compactação leve em molde pequeno como da compactação pesada em molde pequeno são apresentados na Figura 61 e na Tabela 11.

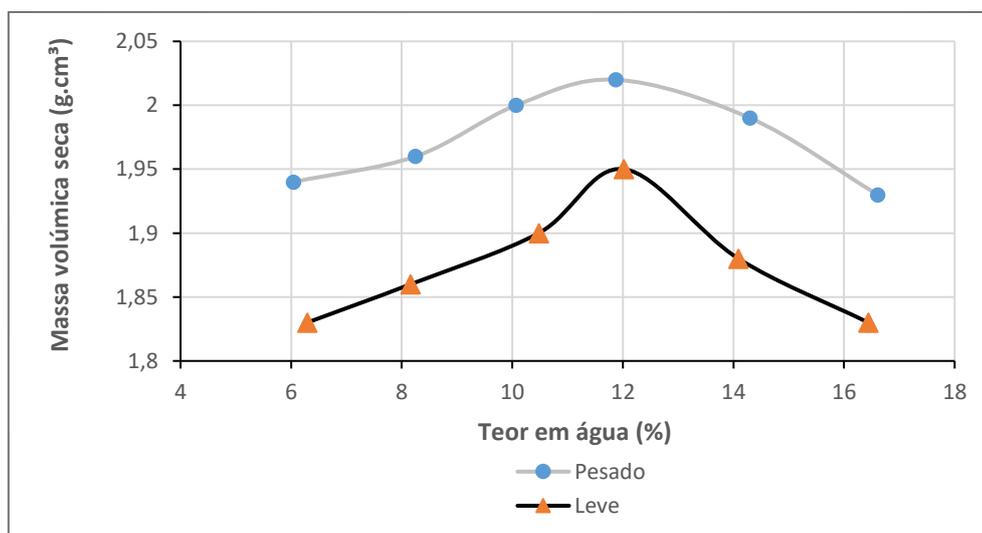


Figura 61: Ensaio de Proctor

Tabela 11: Resultados obtidos do ensaio de Proctor

Proctor Leve	Teor em água ótimo (%)	12,02
	Massa volúmica seca (g/cm ³)	1,95
Proctor Pesado	Teor em água ótimo (%)	11,87
	Massa volúmica seca (g/cm ³)	2,02

Após a análise dos resultados obtidos, verifica-se que quanto maior for a energia de compactação, maior será a massa volúmica seca, menor a porosidade e consequentemente a permeabilidade do solo será menor.

O grupo CRAtérre classifica o solo para construção em terra segundo a sua massa volúmica seca (Tabela 12) [69].

Tabela 12: Massa volúmica seca após compactação

Massa volúmica seca (g/cm³)	Classificação
1,65-1,76	Medíocre
1,76-2,1	Muito satisfatório
2,1-2,2	Excelente
2,2-2,4	Excepcional

O solo caracterizado apresenta uma massa volúmica seca máxima de 1,95 e 2,02 g/cm³. De acordo com a classificação do grupo CRAtérre o solo utilizado para a produção dos BTC apresenta uma massa volúmica seca dentro do intervalo “muito satisfatório”.

Na construção em terra, o teor em água ótimo, não conduz necessariamente à máxima densidade ou compactação, e consequentemente, não conduz a uma máxima resistência à compressão [5]. Segundo a norma alemã DIN 18127:2012 [70] o solo não deve ser preparado com o teor de água ótimo, mas sim um pouco mais elevado. De facto, o teor de água ótimo, na prática pode ser designado por teor em água mínimo. Foi demonstrado nos BTC que um teor de água 10% mais elevado do que o teor de água ótimo resulta em melhores resultados [5].

4.1.3 Limites de Consistência

O solo quando submetido a um determinado teor de humidade, pode adquirir diferentes comportamentos: sólido, semissólido, plástico ou líquido. O teor de humidade que provoca que ocorra a transição do solo do estado sólido para o semissólido designa-se por limite de contração, do semissólido para o plástico é denominado de limite de plasticidade e do plástico para o líquido é chamado de limite de liquidez [71]. Neste estudo foram analisados os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP).

4.1.3.1 Limite de Liquidez

O ensaio do Limite de Liquidez de uma amostra do solo é realizado através de uma concha de Casagrande. Neste tipo de ensaio é colocada uma pasta de solo na concha, onde se faz uma ranhura no centro da amostra. O teor de humidade necessário para fechar essa ranhura após 25 pancadas é definido como limite de liquidez. Este foi obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor de água de cada uma das quatro amostras analisadas, para o mesmo solo, com o número de pancadas.

Na Tabela 13 são demonstrados os resultados do ensaio do limite de liquidez. Através dos diferentes teores em água consoante o número de pancadas, foi traçada uma regressão linear que relaciona os dois parâmetros (Figura 62). Posteriormente, efetuou-se uma interpolação para determinar o valor do teor em água correspondente às 25 pancadas. O valor obtido do limite de liquidez (LL) foi de 29%.

Tabela 13: Resultados do ensaio de limite de liquidez

Número da cápsula	1	2	3	4
Peso da cápsula + toma húmida (g)	16,37	15,18	17,66	14,87
Peso da cápsula + toma seca (g)	14,36	13,47	15,42	12,83
Água na toma (g)	2,01	1,71	2,24	2,04
Peso da cápsula (g)	7,64	7,58	7,57	5,48
Toma seca (g)	6,72	5,89	7,85	7,35
Teor em água (%)	29,91	29,03	28,54	27,76
Número de golpes	16	24	27	35

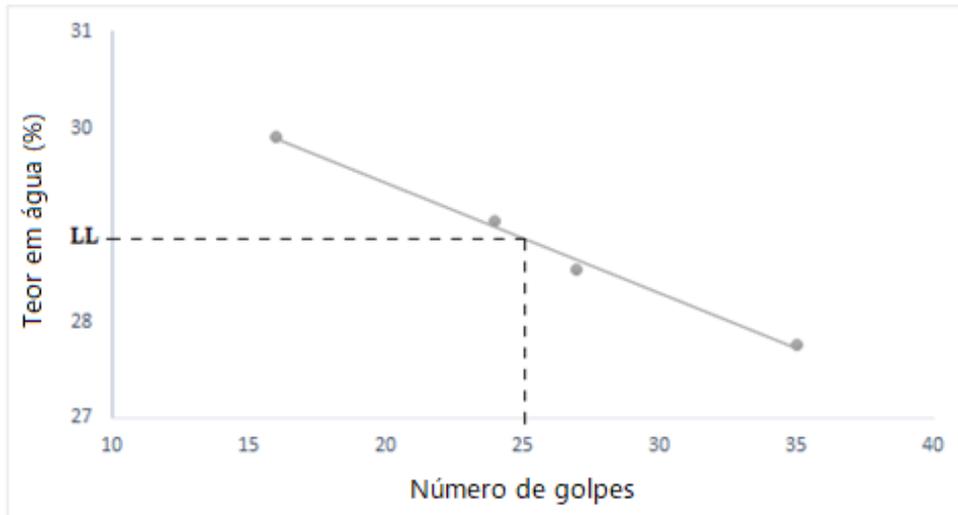


Figura 62: Determinação do limite de liquidez

O grupo CRAterre recomenda que para a construção em terra o limite de liquidez deve variar entre (Tabela 14)[69].

Tabela 14: Limite de liquidez para solos utilizados na construção em terra

	Recomendados	Máximos e mínimos
Limite de liquidez	35-30	50-25

Como é possível verificar o solo estudado apresenta um limite de liquidez, dentro dos limites de “Máximos e mínimos” demonstrados na Tabela 14, e que ronda o valor limite inferior de liquidez recomendado para utilização deste solo na construção em terra.

4.1.1.1 Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade (LP) é o teor de humidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido, ou seja é a fase em que o solo perde a capacidade de ser moldado e fica quebradiço. O ensaio de determinação do limite de plasticidade consiste em moldar quatro pequenas esferas de diâmetro sensivelmente iguais, onde, se rola essas esferas até se transformar num filamento cilíndrico, o ensaio é considerado válido quando se dê a rotura do filamento, ou seja quando o seu diâmetro atinga cerca de 3 mm. O limite de plasticidade corresponde ao valor médio dos teores de humidade das quatro amostras do solo.

O teor de humidade das amostras de solo é obtido através do quociente entre a massa de água e a sua massa seca. Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de determinação do limite de plasticidade.

Tabela 15: Resultados do ensaio do limite de plasticidade

Número da cápsula	1	2	3	4
Peso da cápsula + toma húmida (g)	6,58	5,33	8,16	7,53
Peso da cápsula + toma seca (g)	6,45	5,21	8,08	7,15
Água na toma (g)	0,13	0,12	0,08	0,38
Peso na cápsula (g)	5,73	4,57	7,62	5,02
Toma seca (g)	0,72	0,64	0,46	2,13
Teor em água ω (%)	18,06	18,75	17,39	17,84

O valor médio obtido do limite de plasticidade (LP) foi de 18%. O grupo CRATERRE recomenda que para a construção em terra, o limite de plasticidade deve respeitar os valores observados na Tabela 16 [69]. Mais uma vez, verifica-se que o solo caracterizado apresenta um limite de plasticidade dentro dos valores recomendado para construção em terra.

Tabela 16: Limite de plasticidade para solos utilizados na construção em terra [69]

	Recomendados Máximo e mínimos	
Limite de plasticidade	22-12	25-10

Na Mecânica dos solos, é possível determinar o Índice de Plasticidade (IP) através da diferença numérica entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), dado pela (Equação 6):

$$IP = LL - LP \quad \text{(Equação 6)}$$

O índice de Plasticidade é expresso em percentagem e é interpretado em função da massa de uma amostra de solo como a quantidade máxima de água que pode ser adicionada a essa amostra, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. A (Equação 6) permite identificar o grau de plasticidade do solo.

O solo caracterizado continha um índice de plasticidade de 11%. Ao apresentar baixo índice de plasticidade, indica que o solo contém baixo teor de argila [72].

O Grupo CRATERRE indica que o índice de plasticidade deve respeitar os intervalos indicados na Tabela 17 [69].

Tabela 17: Índice de plasticidade para solos utilizados na construção em terra

	Recomendados Máximos e mínimos	
Índice de plasticidade	18-7	29-7

O Grupo CRATERRE, apresenta também uma classificação para as classes de plasticidade, consoante o parâmetro índice de plasticidade (Tabela 18) (IP).

Tabela 18: Classificação da plasticidade do solo

Plasticidade	IP
Fraca	5-10
Média	10-20
Forte	>20

Tal como se pode verificar, o índice de plasticidade também se encontra no intervalo recomendado para a construção em terra e apresenta uma plasticidade média muito próxima à plasticidade fraca. Contudo, como o solo contém um baixo teor de argila, a interpretação dos resultados do índice de plasticidade (IP) apenas pode ser qualitativa, pois um valor de IP elevado pode depender do tipo de argila e não do seu teor. Porém, o IP é particularmente fiável para caracterizar solos médios a fortemente argilosos, e pouco representativo para solos pouco a médio argilosos. Atendendo a estes factos, utiliza-se o ensaio azul de metileno, como método de caracterização da atividade dos solos argilosos e como complemento dos valores obtidos no ensaio de limites de consistência [72].

Voth [73] apresenta uma caracterização do solo de acordo com os Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) e com o Índice de Plasticidade (IP), conforme se pode verificar na Tabela 19. De acordo com a caracterização feita pelo autor, o solo em estudo seria caracterizado como um solo siltoso, uma vez que apresenta um LL= 29%, LP= 18% e IP= 11%.

Tabela 19: Índice de plasticidade [73]

Tipo de solo	LL (%)	LP (%)	IP
Arenoso	10-23	5-23	<5
Siltoso	15-35	10-25	5-15
Argiloso	28-150	20-50	15-95
Bentonita	40	8	32

4.1.2 Determinação do teor de finos através do ensaio de Azul de Metileno

Este ensaio consiste na determinação da quantidade necessária de corante azul de metileno, para recobrir as superfícies de todas as partículas argilosas presentes no solo numa solução aquosa. Através de adições sucessivas de azul de metileno, é feita a medição por dosagem, até que as partículas argilosas fiquem saturadas.

Os elementos não argilosos do solo praticamente não absorvem corante [72]. Na Tabela 20 apresentam-se os resultados obtidos para a determinação do teor de finos do solo através do ensaio azul de metileno.

Tabela 20: Resultados do ensaio de azul de metileno

Massa seca do provete da fração granulometria 0/2 mm (g)	60
Solução corante adicionada (ml)	136,83
Valor de azul de metileno/kg de fração granulometria 0/2 mm (g/kg)	22,81

É sabido que no ensaio de azul de metileno, quanto maior a percentagem de argilas no solo, maior é a quantidade de solução necessária para tornar o teste da mancha positivo.

O valor obtido no ensaio de azul de metileno foi de 22,81 g de corante por kg de fração de solo inferior a 2 mm de diâmetro. Convertendo para unidades de (g/100g), dá um valor de azul de metileno de 2,281 g de corante por 100 gramas de fração de solo inferior a 2 mm de diâmetro.

Na Tabela 21 apresenta-se o grau de expansão consoante o valor de azul de metileno.

Tabela 21: Proposta de classificação usando o valor de azul de metileno [74]

Valor de azul de metileno (g / 100 g)	Grau de expansão
0 - 4	Baixo
4 - 8	Médio
9 - 15	Alto
> 15	Muito alto

A afinidade da argila com água designa-se por atividade e relaciona-se com outras propriedades, nomeadamente: coesão, plasticidade e expansibilidade [72].

Solo expansivos podem ser um problema para a construção em terra, uma vez que quando sujeitos a variações de humidade devido a alterações climáticas sazonais, alteram a sua consistência [74,75]. Não é este o caso do solo caracterizado, uma vez que apresenta um grau de expansão baixo.

4.1.3 Equivalente de Areia

O equivalente de areia permite avaliar a quantidade e qualidade de elementos finos plásticos contidos numa amostra de solo. Este ensaio tem como objetivo estimar a percentagem de areia existente numa fração de solo com partículas de dimensão inferior a 2 mm.

Foi efetuado duas vezes, pois a primeira vez, deu uma diferença superior a 4 % entre o equivalente de areia de duas amostras no mesmo ensaio, e o ensaio teve de ser repetido. Já no segundo ensaio, como a diferença foi inferior a 4%, considerou-se o ensaio válido e obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados obtidos do ensaio equivalente de areia

	Amostra 1	Amostra 2
Massa do provete (g)	120,40	120,02
H1 (mm)	235,00	227,00
H2 (mm)	54,00	54,40
Equivalente de areia (%)	22,98	24,01
Equivalente de areia médio (%)	23,49	

O equivalente de areia foi determinado segundo a (Equação 1, e resultou de uma percentagem média de areia, existente numa fração de solo com partículas de dimensão inferior a 2 mm, de 23,49%.

Poerschke [76] classifica o solo consoante o equivalente de areia através dos valores apresentados na Tabela 23. O solo caracterizado deu um equivalente de areia de 23,49%, segundo o autor sabe-se que o solo não é considerado um solo mau, porém, só este ensaio não bastava para classificar o solo, tendo que recorrer aos ensaios clássicos de caracterização, os quais foram apresentados anteriormente.

Tabela 23: Classificação do solo através do equivalente de areia

Equivalente de Areia	Classificação
> 30	Solo Satisfatório
< 20	Solo Mau
20 < E.A. < 30	Recorrer aos ensaios clássicos de caracterização

Com base em todos os ensaios efetuados para a caracterização do solo usado para a produção dos BTC, pode-se considerar que o solo estudado é um solo adequado para a construção em terra.

4.2 Caracterização dos Blocos de Terra Comprimida (BTC)

No presente subcapítulo, irão ser apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades dos blocos de terra comprimida e consequente análise e interpretação, bem como a possível comparação com outros blocos que apresentem características similares aos em estudo. Os BTC foram cedidos pela empresa “Betão e Taipa”, já curados e preparados para ser utilizados em obra, e são compostos por 6% de cal hidráulica, 1% de cal hidratada, 10% de água e o restante é constituído por solo. Foram compactados com recurso a uma prensa hidráulica “Eco Master Double Automática”, e possuem dimensões de 30×15×7 cm³. A empresa recomenda que os BTC sejam utilizados para elementos construtivos de compartimentação, sendo a idade dos BTC desconhecida.

4.2.1 Determinação do teor de humidade por secagem ao ar

Este ensaio não estava previsto no planeamento da campanha experimental, contudo devido à humidade que os blocos de terra comprimida apresentavam no dia da sua chegada, por terem estado armazenados em local húmido, foi necessário efetuar a sua secagem. Na Figura 63 é apresentado o teor de humidade perdido ao longo dos dias, até que os provetes apresentassem uma diferença menor do que 0.1% de perda de massa. A Tabela 24 apresenta a percentagem do teor de água total perdido.

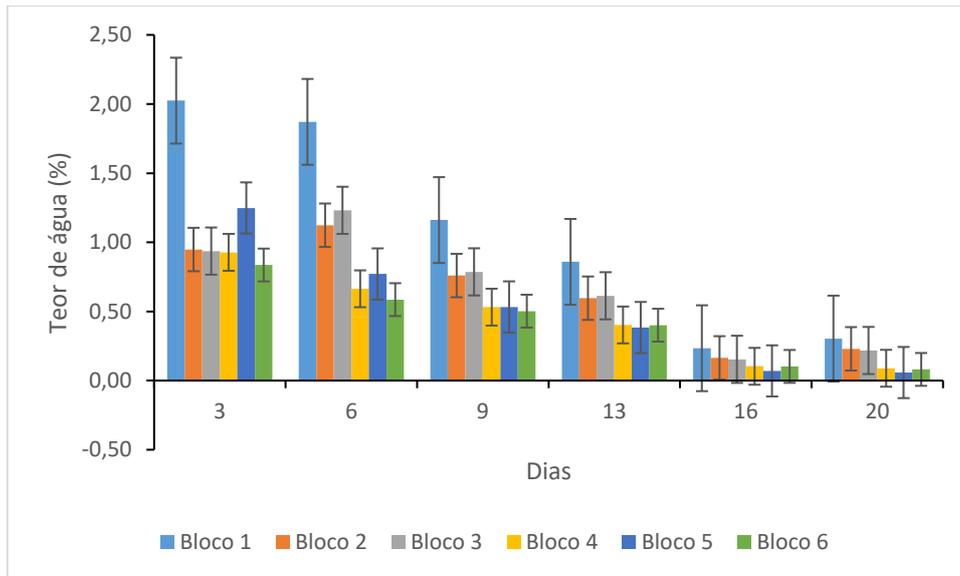


Figura 63: Teor de humidade dos blocos por secagem ao ar

Tabela 24: Teor de humidade ao fim de 20 dias

Blocos	Teor de humidade total (%)			Coeficiente de variação
	20 dias	Média	Desvio Padrão	
1	6,45			
2	3,82			
3	3,94	3,75	1,44	0,38
4	2,72			
5	3,07			
6	2,51			

Como se pode verificar, só um dos blocos é que apresentava um valor fora do padrão comparativamente com os restantes. Os blocos de terra comprimida apresentaram em média um teor de humidade por secagem ao ar de 3,75 % ao fim de 20 dias.

4.2.2 Resistência à compressão

Este ensaio é considerado o ensaio de referência dos BTC, visto que está diretamente relacionado com as restantes propriedades mecânicas do material. Na Tabela 25 são apresentados os resultados determinados no ensaio de resistência à compressão (Figura 64), bem como a respetiva tensão de rotura.



Figura 64: Ensaio à compressão: rotura do provete

Tabela 25: Resultados do ensaio à compressão

Provete	Massa média (g)	Dimensões médias (mm)			Tensão de rotura (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação
		Comprimento	Largura	Altura				
1	5719,3				11,05			
2	5987,5				7,80			
3	5761,2	299	150	69	8,09	9,04	1,26	0,14
4	5602,8				9,71			
5	5828,4				9,45			
6	5861,2				8,12			

Segundo a norma NBR 8491:1984 [77] os critérios estabelecidos para o controlo de qualidade para BTC não estruturais, estabilizados com cimento são apresentados na Tabela 26. Estes limites, também podem ser adotados, como referência para avaliação de BTC, independente do tipo de ligante [10].

Tabela 26: Limite especificados para BTC não estrutural [10]

	Nº exemplares	Exigência NBR 8491/1984	
		valor médio	valor individual
Resistência à compressão	10	$\geq 2,0$ MPa	$\geq 1,7$ MPa

Na Tabela 26, é apresentado o limite especificado para BTC não estrutural, que é de 2 MPa, visto que os BTC caracterizados apresentam um valor médio de resistência à compressão de 9,04 MPa, cumprem o limite da especificação. González-López *et al* [78], mencionam que em algumas normas recomendam um mínimo de 6 MPa para BTC com capacidade

estrutural. Assim sendo, os blocos caracterizados podem também ser usados com função estrutural, pois apresentam um valor médio de resistência à compressão de 9,04 MPa, ultrapassando os 6 MPa, que é o valor mínimo recomendado para BTC com capacidade estrutural.

Guettala *et al.* [79], estudou diferentes blocos de terra comprimida, com diferentes percentagens de cal (5, 8 e 12%) e diversas tensões de compactação (5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 MPa), que resultaram naturalmente em diferentes resistências à compressão. O autor concluiu que a percentagem de cal que apresenta maior resistência é a de 12% e concluiu também, que a tensão de compactação ideal é de 17,5 MPa. Comparativamente com os BTC caracterizados, os blocos estudados pelo autor descritos anteriormente, com percentagem de cal de 5%, apresentam uma resistência à compressão de 8,5 MPa e 12,5 MPa, quando compactados a 5 MPa e 17,5 MPa, respetivamente. A resistência à compressão dos blocos caracterizados é de 9,04 MPa, estando no intervalo das resistências obtidas no estudo, não se podendo comparar diretamente porque não se sabe a tensão de compactação dos BTC caracterizados.

Riza *et al.* [42] concluiu que um aumento de tensão de 5 para 20 MPa, ocorre uma melhoria na resistência à compressão até 70%. Tal acontece, porque promove um rearranjo da estrutura interna da fase sólida (empacotamento granular) e da fase fluída, diminuindo a quantidade de poros microscópicos e macroscópicos. Essa modificação resulta numa diminuição da porosidade do material e conseqüentemente o aumento da sua densidade [80]. Outro fator importante, que influencia a resistência à compressão, é a composição granulométrica. González-López *et al.* [78] concluiu que a resistência à compressão aumentou mais de 200%, alterando apenas a distribuição granulométrica do solo.

4.2.3 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica define o quanto um material se opõe à passagem de corrente elétrica. Os provetes são ensaiados saturados de modo a determinar a resistividade mínima. Os resultados obtidos no ensaio da resistividade elétrica são apresentados na Tabela 27. Na medição da face em comprimento os valores são muito idênticos o que demonstra ter a mesma densidade e porosidade, já na medição da face em largura o provete 2 destaca-se por ter maior resistividade, este provete pode ser menos denso e/ou conter maior número de poros.

Tabela 27: Resultados do ensaio da resistividade elétrica

Provete	Resistividade na face em comprimento (kΩcm)				Resistividade na face em largura (kΩcm)			
	R.E.	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação	R.E.	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
1	1,10	1,07	0,06	0,05	2,40	2,33	0,06	0,02
	1,00				2,30			
	1,10				2,30			
	1,00				3,00			
2	1,10	1,07	0,06	0,05	2,90	2,93	0,06	0,02
	1,00				2,90			
	1,00				2,30			
	1,00				2,30			
3	1,20	1,10	0,10	0,09	2,50	2,37	0,12	0,05
	1,10				2,30			
	1,10				2,30			

A resistividade elétrica depende diretamente da maior ou menor comunicação entre os poros e da sua humidade relativa [81,82]. Como os BTC se encontravam armazenados no mesmo local, estavam separados entre si (Figura 44-(b)), com intuito de facilitar a ventilação das diferentes unidades. Estando todos expostos a mesma humidade relativa, a resistividade elétrica dos blocos está diretamente ligada com a porosidade. A existência de diferentes valores para a resistividade elétrica, significa que existem diferentes porosidades, que se pode dever a defeitos na homogeneização da mistura.

4.2.4 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons permite avaliar características dos materiais tais como: módulo de elasticidade dinâmico, homogeneidade, resistência mecânica e a presença de fissuras. Este ensaio é um ensaio não destrutivo e consiste na determinação do tempo que as ondas ultrassónicas demoram a percorrer a distância entre um transdutor emissor e um recetor, sabendo o tempo de propagação e a distância entre os pontos dos transdutores pode-se calcular a velocidade de propagação [20].

Na Tabela 28 são apresentados os resultados obtidos para velocidade média de propagação de ultrassons das cinco medições efetuadas para cada provete e, consequentemente, a velocidade média dos três provetes.

Tabela 28: Velocidade de propagação dos ultrassons

Provete	Método direto			Método indireto		
	Velocidade [m/s]			Velocidade [m/s]		
	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
1	907,9	4,2	0,46	844,101	47,87	5,67
2	852	10,2	1,25	863,81	73,01	8,45
3	984,2	70,1	7,13	841,71	68,9	8,19

Um impulso sonoro propaga-se com menor velocidade num meio poroso e com maior velocidade num meio mais denso. Pela análise dos resultados observa-se que o provete 2 apresenta uma menor velocidade de propagação de ultrassons, o que pode indicar a presença de um maior número de vazios. Esta diferença de velocidades pode dever-se também à presença de defeitos na homogeneidade e/ou presença de fissuras.

Gomes [20] caracterizou dois tipos de BTC estabilizados. O primeiro conjunto (lote B) de blocos foi fabricado em Almendralejo (Espanha) em 2012, estabilizados com 5% de cal aérea e 1.7% de cimento, prensados numa prensa hidráulica. Os do segundo lote (lote E) foram fabricados no Telheiro da Encosta do Castelo de Montemor-o-Novo em 2012, estabilizados com 6,25% de cal hidráulica, prensados numa prensa manual da TERSTARAM. Os resultados obtidos para o teste de velocidade de propagação do som foram os apresentados na Tabela 29:

Tabela 29: Velocidade de propagação dos ultrassons por método direto [20]

Lote	Velocidade [m/s]	
	Média	Desvio P.
B	1142,0	228,7
E	884,1	105,7

O autor concluiu que, o lote B apresenta maior valor de velocidade de propagação, comparativamente ao lote E, porque os blocos do lote B foram prensados com recurso a uma prensa hidráulica, tornando-se um material mais compacto, permitindo que a velocidade de propagação de um impulso seja superior.

Os blocos do lote E apresentam uma constituição muito idêntica à dos blocos em estudo nesta dissertação, que são constituídos por 6% de cal hidráulica e 1 % de cal hidratada

para 6,25% de cal hidratada, respetivamente. Os blocos caracterizados foram prensados por uma prensa hidráulica, garantindo maior força de compactação. No entanto, a média da velocidade de propagação dos ultrassons no método direto é quase idêntica, podendo assim concluir que os blocos caracterizados apresentam uma maior número de vazios, sendo mais poroso, que os dois blocos estudados em [20].

4.2.5 Absorção de água por imersão

No decorrer da campanha experimental tentou-se realizar a caracterização dos blocos de terra comprimida no seu estado saturado mas, como descrito no capítulo 3, não foi possível completar o ensaio, pois, passados poucos minutos de estarem imersos em água, começavam a desintegrar-se, chegando ao fim do ensaio bastante desintegrados e muito frágeis.

Existem alguns autores que mostraram que BTC não estabilizados e sem qualquer proteção superficial se desintegravam durante o ensaio de absorção de água por imersão [21,83,84]. Assim, pode-se afirmar que os BTC em estudo não se podem utilizar em locais que seja expectável um contacto prolongado com a água.

Tendo por base as dificuldades reportadas anteriormente, optou-se por se fazer uma modificação no ensaio, mudando os diferentes tempos de medição das massas dos provetes fora e dentro de água (1h, 2h, 3h, 4h, 5h). Este ensaio foi modificado com intuito de determinar a taxa de absorção de água por imersão nas primeiras 5h. Na Tabela 30 encontram-se apresentados os resultados obtidos após a modificação dos tempos de análise.

Tabela 30: Resultados obtidos no ensaio modificado de absorção de água por imersão

Horas (h)	Massa dos provetes (g)					
	Fora de água			Dentro de água		
	1	2	3	1	2	3
0	5910,1	5970,5	5849,9	-	-	-
1	6422,5	6625,8	6435,1	3359,2	3466,4	3356,2
2	6423,1	6643,2	6376,1	3361,3	3491,4	3330,8
3	6389,4	6621,9	6341,7	3341,6	3481,7	3311,3
4	6364,8	6629,3	6311,1	3327,4	3475,8	3293,0
5	6362,5	6626,5	6316,6	3321,5	3473,4	3286,4

Como se pode verificar, a massa do provete 3 diminuiu na medição das 2h, acontecendo o mesmo, passadas 3h, no caso os provetes 1 e 2. Normalmente, a sua massa deveria aumentar até ficarem totalmente saturados, não sendo possível acabar o ensaio, pois começaram a desintegrar-se, acabando por perder massa. Porém, como se pode verificar na Tabela 30 e Tabela 31, principalmente no caso dos provetes 1 e 2, estes já se encontravam perto de ficarem saturados, e obtiveram uma absorção de água por imersão de 16.75%, 21.34%, e 19.01%, respetivamente.

Tabela 31: Absorção de água por imersão

Horas (h)	Absorção de água por imersão (%)		
	1	2	3
1	16,73	20,74	19,01
2	16,75	21,34	-

Após analisar os resultados obtidos, observou-se que a cinética de absorção de água dos blocos foi muito rápida na primeira hora do ensaio. Tal acontecimento poderá ser explicado pela alta porosidade [85] dos blocos, sendo de notar que a maior absorção de água registada para o Provete 2 poderá indicar uma maior porosidade nesse bloco. Estes resultados já se tinham verificado nos ensaios de resistividade elétrica e de velocidade de propagação de ultrassons.

Na Figura 65 à Figura 68, é apresentado o estado dos três provetes de ensaio após a conclusão do ensaio modificado da absorção de água por imersão. Na Figura 69, pode-se visualizar os provetes secos e o tabuleiro da perda de massa que ocorreu durante o ensaio. Na Tabela 32 é apresentada a perda de massa ocorrida durante o ensaio. Segundo norma NBR 8492:1984 [86], no caso de blocos estabilizados com cimento, a absorção de água máxima é de 20%. Ainda que não se possa recorrer objetivamente à analogia, até ao ensaio terminar, seria provável obter valores próximos ou superiores a 20% (Tabela 31) que, segundo a norma, implica que estes blocos não possam ser aplicados em ambientes húmidos.

No entanto, de relembrar que estes BTC foram concebidos para serem usados exclusivamente em elementos construtivos para compartimentação, não necessitando de serem resistentes à água.



Figura 65 : Absorção de água por imersão: provete 1



Figura 66: Absorção de água por imersão: provete 2



Figura 67: Restantes fotos do ensaio de absorção de água por imersão: provete 2



Figura 68: Absorção de água por imersão: provete 3



Figura 69: Provetes do ensaio de absorção de água por imersão e perda de massa

Tabela 32: Massa perdida durante o ensaio de absorção de água por imersão e perda de massa

Massa	Provetes (g)		
	1	2	3
Início do ensaio	5910,1	5970,5	5849,9
Fim do ensaio	5472,0	5725,7	5410,2
Perda de massa	438,1	244,8	439,7

Segundo Guettala *et al.* [79], que estudou diferentes blocos de terra comprimida, com diferentes percentagens de cal (5, 8 e 12%) e diversas tensões de compactação (5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 MPa), obteve diferentes percentagens de absorção de água por imersão. Concluiu que, a evolução do coeficiente de resistência à água aumenta com o aumento do teor de cal e das tensões de compactação. Os BTC caracterizados apresentam um valor de absorção por imersão que tende a ser um pouco maior que o apresentado no estudo descrito, quando comparado com o valor de absorção quando a tensão de compactação é 5 MPa e percentagem de cal de 5%. De notar que, na primeira parte, o autor estudou a influência do conteúdo de areia e corrigiu a sua granulometria, ficando com a granulometria ideal. Ao corrigir a granulometria, corrige a quantidade e tamanho dos poros. Consequentemente, resulta em menos volume de vazios (porosidade reduzida) ficando a estrutura mais compacta e densa, mais resistente e, portanto, de melhor qualidade [72]. A densidade de um material está diretamente associada à permeabilidade, pois, à medida que a densidade do solo aumenta, a sua porosidade diminui e menos água poderá penetrá-lo [87].

Após análise do estudo descrito anteriormente, e sabendo que os blocos caracterizados já se encontram curados há mais de 60 dias (onde, consoante o estudo ocorre uma redução drástica na absorção de água) e apresentariam valores que ultrapassariam os 20 %, ocorrendo muito pouca redução de absorção de água daqui adiante, pode-se concluir que os blocos caracterizados segundo a norma NBR 8492:1984 [86] não poderão ser aplicados em ambientes húmidos.

Pode-se concluir que a justificação para os resultados obtidos neste ensaio é a mesma utilizada nos ensaios anteriores, e reside sobretudo ao nível da porosidade aberta dos blocos. Ao longo deste ensaio os blocos foram-se desintegrando, e foi perceptível que na sua composição, este continha partículas grossas, substancialmente superiores ao recomendado (partículas com diâmetro inferior a 4,75 mm). Esta pode ser uma das razões para a elevada porosidade dos BTC. Apesar destes resultados, Minke [5] menciona que, dada a suscetibilidade das construções em terra à água, este ensaio na realidade é desnecessário, uma vez que os materiais de construção em terra de uma edificação nunca estarão permanentemente mergulhados em água.

4.2.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade acontece devido à diferença de pressões entre a superfície livre de água em contacto com o provete e a superfície de água nos vasos capilares. Na Figura 70 e na Tabela 33 é apresentada a ascensão da água ao longo do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Tabela 33: Altura e tempo da ascensão da água por capilaridade

Tempo	Medição (cm)		
	Provete		
	1	2	3
30 min	6,0	6,5	5,3
1 h	7,0	6,8	5,8
2h	8,5	9,0	6,8
4h	10,3	10,7	8,4
6h	11,8	12,7	9,4
24h	Totalmente saturado		



Figura 70: Ensaio de ascensão de água por capilaridade

Na Figura 71 encontra-se o gráfico que mostra a absorção de água por capilaridade ao longo do tempo. Na Figura 72 e na Tabela 33 é apresentado o valor do coeficiente de capilaridade (C_b), que é um indicador da velocidade de absorção. Este é obtido pelo cálculo do declive do troço reto das curvas de absorção e, quanto maior o declive, mais rápida é a absorção de água por capilaridade.

Após analisar o conjunto de imagens e a tabela apresentadas em cima, é de fácil percepção que a ascensão da água até ficar totalmente saturado, ocorreu de forma mais rápida no provete 2, posteriormente no provete 1 e por fim no provete 3.

Após terminar este ensaio, com os provetes ainda húmidos, realizou-se o ensaio de resistividade elétrica e uma das conclusões que se obteve nesse ensaio foi que o provete

2 era o provete que se apresentava menos denso, isto é, com maior porosidade. Segundo Lawane *et al.* [85] a altura da ascensão da capilaridade é inversamente proporcional à dimensão do canal dos poros. Assim sendo, conclui-se que o provete 2 apresenta uma maior porosidade, mas com poros de menor dimensão.

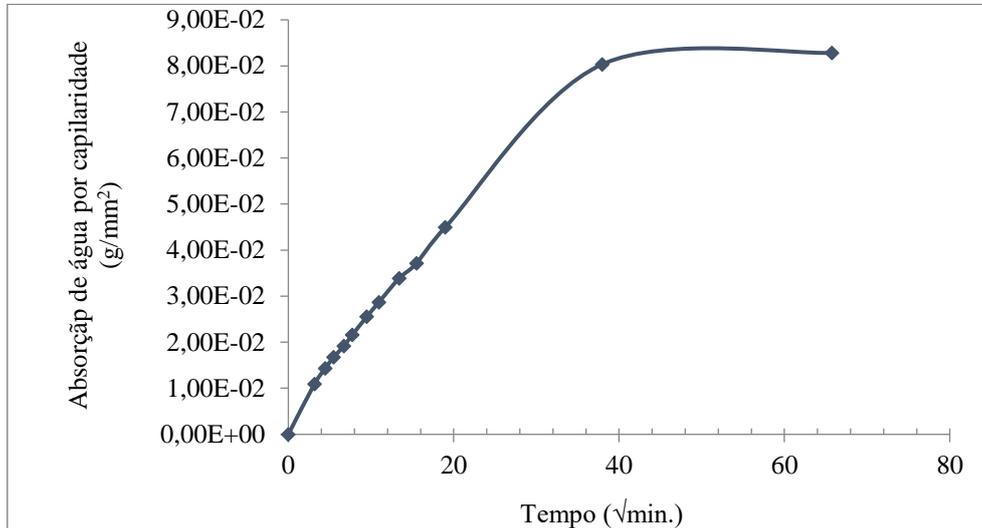


Figura 71: Absorção de água por capilaridade

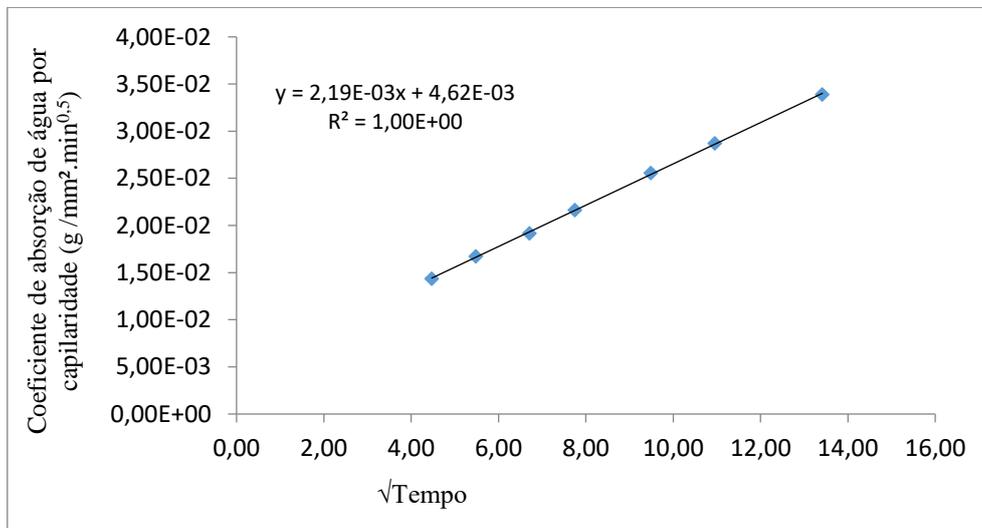


Figura 72: Declive do trecho reto das curvas de absorção (Cb)

Gomes [20] caracterizou dois tipos de BTC estabilizados, os blocos do lote B estabilizados com 5% de cal aérea e 1.7% de cimento, prensados numa prensa hidráulica. Os do lote E foram estabilizados com 6,25% de cal hidráulica, prensados numa prensa manual da TERSTARAM. Como resultado obteve-se uma velocidade de absorção (Cb) de 1,14 e 3,37 kg/mm²·min^{0,5}, para os lotes B e E, respetivamente. A quantidade de água absorvida até a conclusão do ensaio foi de 18,81 e 26,08 kg/m², respetivamente. Tal como se pode

verificar na Figura 71 e na Figura 72, os blocos caracterizados obtiveram um C_b de 2,19 $\text{kg}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e uma quantidade de água absorvida de 82,84 kg/m^2 . Consta-se que o valor do C_b é similar ao dos valores do estudo descrito anteriormente, podendo ser explicado, pela da densidade e porosidade dos BTC conforme já tinha sido observado no ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons, onde se registou que estes blocos eram mais porosos, daí a explicação para uma maior absorção de água por capilaridade.

Na Tabela 34 e na Figura 73 é apresentada a perda de massa que ocorreu durante a realização do ensaio. É de salientar, que no caso do provete 2, ao retirá-lo de cima da balança, após última medição do ensaio, este desintegrou-se, não sendo possível pesá-lo depois de seco.

Tabela 34: Massa perdida: Ensaio de absorção de água por capilaridade

Massa	Provetes (g)		
	1	2	3
Início do ensaio	6133,3	5710,2	5798,2
Fim do ensaio	5993,4	desintegrou-se	5714,9



Figura 73: Estado dos blocos após o ensaio de absorção de água por capilaridade

Após a realização do ensaio pode-se concluir que os provetes estando saturados são elementos frágeis. No entanto, é de ressaltar que os blocos depois de secos voltam a ganhar resistência.

Guettala *et al.* [79], estudou diferentes blocos de terra comprimida, com diferentes percentagens de cal (5, 8 e 12 %) e diversas tensões de compactação (5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 MPa), o que originou diferentes absorções de água por capilaridade, e concluiu

que a absorção capilar diminui ao aumentar as tensões de compactação e o teor de cal. A máxima absorção de água por capilaridade obtida no estudo foi de 5 %, quando estabilizado com 5 % de cal. Os blocos caracterizados obtiveram uma absorção de água por capilaridade de 12,89 %. Mais uma vez, esta diferença poderá estar relacionada com a elevada porosidade dos blocos caracterizados.

4.2.7 Estudo da Durabilidade através do ensaio de erosão à chuva

O ensaio de erosão à chuva permite determinar a degradação de uma face do bloco, provocado pela queda de água, com intuito de verificar a resistência superficial à erosão, avaliando deste modo a durabilidade do bloco.

De seguida, serão apresentadas as fotos das diferentes faces dos 7 provetes, antes e depois do ensaio (Figura 74 à Figura 98). De modo a se ter uma melhor perceção da massa perdida durante a realização deste ensaio, foram colocadas linhas para demonstrar as dimensões originais dos blocos, bem como as suas respetivas dimensões.

Segundo a norma NZS 4298:1998 [63], classifica-se o índice de erosão por hora dos BTCs consoante a profundidade de erosão em milímetros e o sistema de classificação está apresentado na Tabela 35.

Tabela 35: Classificação dos BTC segundo a profundidade

Critério (mm/h)	Índice de erosão
$0 \leq D < 20$	1
$20 \leq D < 50$	2
$50 \leq D < 90$	3
$90 \leq D < 120$	4
$D \leq 120$	5 (Rejeitado)

Este ensaio avalia a profundidade de erosão em milímetros, durante uma hora, na área onde o jato incide. No entanto, após analisar o estado do provete 1 no fim do ensaio, como não apresentou praticamente nenhuma erosão, optou-se por modificar a duração do ensaio para 2 h, pensando que os restantes provetes apresentariam a mesma resistência à erosão. Contudo, tal não aconteceu, e a classificação segundo a norma apresentada na Tabela 36, poderá não corresponder ao índice de erosão que teriam ao fim de 1 h.

Tabela 36: Índice de classificação dos 7 provetes

Provetes	1	2	3	4	5	6	7
Índice de erosão	1	5	2	5	5	5	5



Figura 74: Ensaio de Erosão: Provetes 1 face 1



Figura 75: Ensaio de Erosão: Provetes 1 face 2



Figura 76: Ensaio de Erosão: Provetes 1 face 3



Figura 77: Ensaio de Erosão: Provete 1 face 4



Figura 78: Ensaio de Erosão: Provete 2 face 1



Figura 79: Ensaio de Erosão: Provete 2 face 2



Figura 80: Ensaio de Erosão: Provete 2 face 3



Figura 81: Ensaio de Erosão: Provete 2 face 4

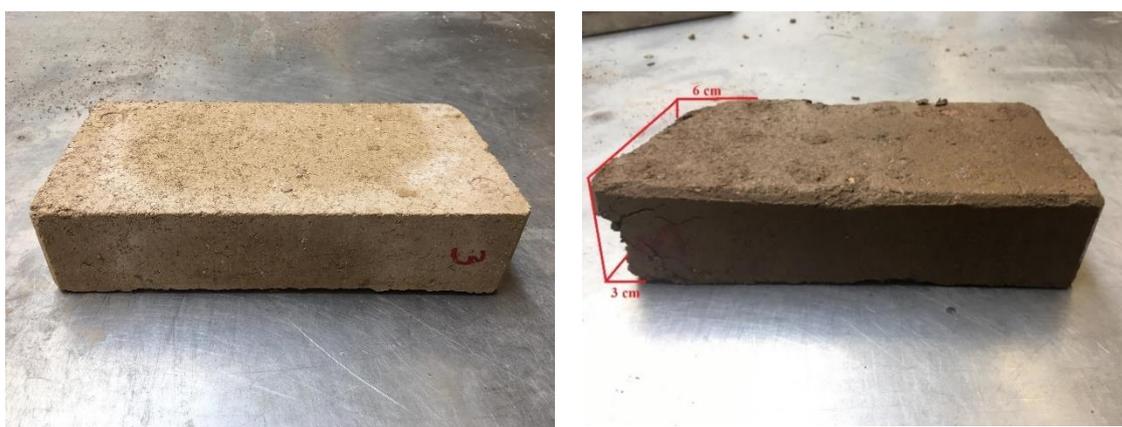


Figura 82: Ensaio de Erosão: Provete 3 face 1



Figura 83: Ensaio de Erosão: Provete 3 face 2



Figura 84: Ensaio de Erosão: Provete 3 face 3



Figura 85: Ensaio de Erosão: Provete 3 face 4



Figura 86: Ensaio de Erosão: Provete 4 face 1



Figura 87: Ensaio de Erosão: Provete 4 face 2



Figura 88: Ensaio de Erosão: Provete 4 face 3



Figura 89: Ensaio de Erosão: Provete 4 face 4



Figura 90: Ensaio de Erosão: Provete 5 face 1



Figura 91: Ensaio de Erosão: Provete 5 face 2



Figura 92: Ensaio de Erosão: Provete 5 face 3



Figura 93: Ensaio de Erosão: Provete 5 face 4



Figura 94: Ensaio de Erosão: Provete 6 face 1



Figura 95: Ensaio de Erosão: Provete 6 face 2



Figura 96: Ensaio de Erosão: Provete 6 face 3



Figura 97: Ensaio de Erosão: Provete 6 face 4



Figura 98: Ensaio de Erosão: Provetes 7

Como se pode verificar, os provetes 1 e 3 foram os únicos blocos que passaram na classificação e todos os outros foram rejeitados. No entanto, os resultados poderiam ter sido outros se o ensaio tivesse duração de uma hora. No entanto, a modificação para duas horas permitiu perceber com maior detalhe a resistência à erosão e também as diferentes formas de deterioração, pois, sabendo que são constituídos pelo mesmo solo, compactados pela mesma prensa e estabilizados pelo mesmo estabilizador, a explicação para se terem provetes, que se diferenciam de tal modo como, os provetes 1 e 6, deve-se à má preparação do solo. A distribuição do tamanho dos grãos precisa ser mais controlada e, por exemplo, todo o solo deverá ser passado no peneiro nº4 (4,75 mm) (recomendado por várias normas), garantindo assim, que as misturas ficam homogêneas, não afetando a qualidade de compactação do bloco durante a produção, mas influenciando de forma positiva a estrutura de vazios, que têm óbvias repercussões no comportamento dos blocos à água [85].

Outra questão que poderá ter influenciado o comportamento dos blocos foi o seu transporte, por algumas centenas de quilômetros, cujas vibrações associadas poderão ter contribuído para a fissuração da sua estrutura e assim facilitar a circulação da água.

Vários estudos contém blocos que passaram neste ensaio. Gomes [21] estudou dois tipos de BTC estabilizados, os blocos do lote B, estabilizados com 5% de cal aérea e 1,7% de cimento, prensados numa prensa hidráulica. Martins [19] estudou blocos estabilizados com 10% de cimento, que também passou no teste. Cid-falceto [88], estudou três tipos de blocos, que são comercializados Espanha. O bloco tipo 1 é um bloco não estabilizado, o bloco tipo 2 e 3 são ambos estabilizados com 6% (tipo 2) e cimento-cal-rápida com 8% (tipo 3). Só o bloco tipo 1, não estabilizado é que não passou.

Capítulo 5 – Conclusões e Perspetivas Futuras

5.1 Conclusões gerais

O presente capítulo passa por descrever as principais conclusões formadas com base na análise e interpretação de resultados da campanha experimental efetuada, que se encontrou focada na caracterização de um solo utilizado no fabrico de blocos de terra comprimida (BTC) existentes no mercado, como material de construção, e na caracterização dos próprios BTC.

O solo caracterizado apresenta uma granulometria extensa, com boa distribuição dos grãos. Segundo várias normas e autores, o solo contém uma granulometria adequada para fabrico de BTC. De acordo com a classificação estabelecida pelo grupo CRAterre, para a construção em terra, o solo apresenta uma massa volúmica seca muito satisfatória. O limite de liquidez apresenta um valor de 29%, muito próximo dos 30% recomendados, o limite de plasticidade está no intervalo de recomendado e o índice de plasticidade também se encontra no intervalo de recomendado para a construção em terra. Confirmou-se também que o solo apresenta uma argila de baixa atividade. Conclui-se então deste modo, que o solo caracterizado é adequado para o fabrico de BTC.

Os BTC caracterizados apresentam uma resistência à compressão elevada, que segundo normas internacionais, podem ser utilizados em elementos construtivos de compartimentação, mas também com função estrutural. Quanto à suscetibilidade à água, já era se esperar, pois, como já mencionado anteriormente, estes BTC destinam-se exclusivamente para elementos de compartimentação, não tendo sido concebidos para ser resistentes à água. Caso se apliquem os mesmos num elemento construtivo exterior, será necessário equacionar as adequadas medidas de proteção. Pode-se concluir também que os BTC apresentavam uma elevada porosidade, podendo dever-se às partículas de grandes dimensões (> 4,75 mm) que foram encontradas nos BTC, quando estes se desintegraram. Esta constatação poderá estar também relacionada com defeitos de homogeneização da mistura, pela forma distinta com que cada provete se desintegrou.

Os BTC analisados são, na generalidade, adequados para a construção de alvenaria de compartimentação. Sugere-se apenas, de modo a se obter uns BTC com maior qualidade, que ocorra um maior controlo na homogeneização da mistura e na preparação dos materiais, antes da sua utilização na preparação dos blocos de terra comprimida.

5.2 Perspetivas Futuras

De seguida, são apresentadas algumas propostas de trabalho de investigação que foram surgindo ao longo deste trabalho e que podem ser elaboradas futuramente:

- Fazer a caracterização térmica e acústica dos blocos caracterizados neste trabalho de modo a obter uma caracterização mais completa;
- Caracterizar paredes com os BTC caracterizados, com diferentes argamassas;
- Criar uma correlação entre a resistência mecânica do bloco e a resistência mecânica das paredes construídas com esses blocos e com variáveis dos diferentes tipos de argamassa;
- Fabricar um novo BTC com o mesmo solo caracterizado, só que a garantir a qualidade da mistura e peneirar todo o solo (<4,75 mm), com intuito de comparar a influência do processo de produção dos BTC;

Conclui-se assim este trabalho com uma nota crítica pessoal. Após a elaboração deste trabalho e dada a crise ecológica que enfrentamos atualmente, deveríamos olhar para a terra como material de construção. Quero com isto dizer que, se a terra é um material basto em qualidades (apresentadas no capítulo 2), e que, mesmo com algumas limitações (como outro qualquer material, tal como descrito anteriormente), tem a capacidade de minorar o problema da atualidade, dada a sua colossal sustentabilidade, comparativamente a outros materiais de construção correntes. Assim, deveríamos olhar para o projeto das construções com atitude de mudança, recorrendo sempre que possível às potencialidades deste material para a substituição dos de função equivalente que são normalmente utilizados.

“A terra é um material de construção que atende às necessidades do presente sem comprometer as necessidades do futuro” [6]

Referências

- [1] L. Mateus, M. Veiga, J. Brito, A. Silva, Mineralogical and mechanical characterization of rammed earth external renderings of the south of Portugal, 225 (2019) 1160–1169. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.08.030.
- [2] S. Chaibeddra, F. Kharchi, Performance of compressed stabilized earth blocks in sulphated medium, J. Build. Eng. 25 (2019) 100814. doi:10.1016/j.job.2019.100814.
- [3] M. Ben, A. Jelidi, A. Soukaina, S. Ben, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), Constr. Build. Mater. 104 (2016) 44–51. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024.
- [4] CRATerre, (n.d.). <http://craterre.org/> (accessed September 1, 2019).
- [5] G. Minke, Building with earth : Design and technology of a sustainable architecture, 2006. doi:10.1192/bjp.111.479.1009-a.
- [6] P. Donkor, E. Obonyo, Earthen construction materials : Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers, Mater. Des. 83 (2015) 813–819. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.017.
- [7] A. Fabbri, J.C. Morel, Earthen materials and constructions, Elsevier, 2016. doi:10.1016/b978-0-08-100038-0.00010-x.
- [8] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, Constr. Build. Mater. 29 (2012) 512–519. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [9] P. Nunes, Afinal , o que é a sustentabilidade na construção ?, Dissertação de Mestrado, Departamento de Civil, Universidade de Coimbra, 2015.
- [10] C. Neves, O. Faria, Técnicas de construção com terra, Rede Ibero-Americana PROterra, 2011.
- [11] P. Torgal., R. Eires., S. Jalali., Construção em terra, TecMinho, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.
- [12] M. Correia, J. Merten, A taipa alentejana: sistemas tradicionais de protecção, IV Semin. Ibero-Americano Construção Com Terra e III Semin. Arquit. Terra Em Port. Monsaraz. (2005).
- [13] H. Varum, A. Costa, A. Velosa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida, Caracterização mecânica e patológica das construções em adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação, Houses Cities Built with Earth - Conserv. Significance Urban Qual. (2006) 41–45.
- [14] J. Filipe, M. Fernandes, M. Correia, Arquitectura de terra em Portugal, 1ª edição, Argumentum ISBN 972-8479-36-0, Lisboa, 2006.
- [15] R. Silva, D. Oliveira, T. Miranda, M. Escobar, N. Cristelo, Rammed earth: feasibility of a global concept applied locally, 13º Congr. Nac. Geotec. (2012). <http://hdl.handle.net/1822/22028>.
- [16] P. Faria, Construção com terra: Tradição e inovação, P&C Nº 57. (2014).
- [17] P. Jaquin, D. Ciancio, P. Walker, Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth, Constr. Build. Mater. 42 (2013) 40–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049.
- [18] H. Schroeder, The new DIN standards in earth building - The current situation in Germany, J. Civ. Eng. Archit. 12 (2018) 113–120. doi:10.17265/1934-7359/2018.02.005.
- [19] T. Martins, Incorporação de materiais de mudança de fase em blocos de terra

- comprimida, Dissertação de Mestrado, Departamento de Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, n.d.
- [20] N. Gomes, Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias ecoeficientes, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [21] M. Da Silva, Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios, Dissertação de Mestrado, Departamento de Civil, Técnico Lisboa, 2015.
- [22] J. Cid, F.R. Mazarrón, I. Cañas, Las normativas de construcción con tierra en el mundo, *Inf. La Constr.* 63 (2011) 159–169. doi:10.3989/ic.10.011.
- [23] H. Houben, H. Guillaud, *Earth Construction: A comprehensive guide*, CRATerre - EAG, Intermediate Technology Publication, London, 2008.
- [24] H. Fathy, *Natural energy and vernacular architecture*, Chicago/London, 1986.
- [25] P. Lourenço, *Construções em Terra*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.
- [26] P. Lourenço, L. Schueremans, D. Oliveira, R. Silva, A construção em taipa e os sismos, *Sísmica 2010 – 8º Congr. Sismol. e Eng. Sísmica*, Aveiro, Port. (2010) 1–13.
- [27] S. Dobson, *Continuity of tradition: New earth building*, Earth building research forum, University of technology Sydney (UTS), 2000.
- [28] T. Gonçalves, M. Gomes, *Construção de terra crua: Potencialidades e questões em aberto*, Jornadas LNEC, 18 a 20 Junho 2012, Lisboa. (2012) 1–7.
- [29] M. Gomes, *Construção sísmo-resistente em terra crua*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [30] M. Hall, Y. Djerbib, Rammed earth sample production: Context, recommendations and consistency, *Constr. Build. Mater.* 18 (2004) 281–286. doi:10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001.
- [31] BAXI, *Caso real: Edifício com necessidades quase nulas de energia*, (n.d.). <https://www.baxi.pt/ajuda-e-conselhos/energias-renovaveis/edificios-consumo-quase-nulo%0D> (accessed September 16, 2019).
- [32] C. Thormark, The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, *Build Env.* 2006;411019–26. (2006).
- [33] M. Gonzalez, J. Navarro, Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials., *Build Env.* 41902–9. (2006).
- [34] M. Rocha, *Dossier BTC - Vale das Lobas*, CEDACTerra, Badajoz, 2017.
- [35] M. Pisani, *Taipas : A arquitetura de terra*, (2004) 1–8.
- [36] B. Berge, *The ecology of building materials*, 2 Ed. Archit. Press. Elsevier Sci. [ISBN 978-1-85617-537-1]. (2009).
- [37] R. Silva, D. Oliveira, T. Miranda, E. Soares, N. Cristelo, P. Lourenço, *Caraterização do comportamento ao corte de alvenaria de blocos de terra compactada com junta seca*, 9º Congr. Nac. Mecânica Exp. Aveiro. (2014) 15–17.
- [38] F. Torgal, S. Jalali, *Construção em terra : Algumas considerações sobre a selecção de solos*, Conferência Eng. Covilhã, Port. (2009).
- [39] A. Eusébio, *Reabilitação e melhoramento de paredes de terra crua - Taipa*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2001.
- [40] A. Moreira, *Terra Crua*, Instituto politécnico de tomar escola superior de tecnologia de tomar, Departamento de engeheria civil, 2008.
- [41] M. Hoffmann, *Efeito dos argilo-minerais do solo na matéria-prima dos sistemas construtivos com solo-cal*, Artigo Baseado na Sua Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, 2002.
- [42] F. Riza, I. Rahman, A. Zaidi, *A brief review of compressed stabilized earth brick (CSEB)*, (2010) 1011–1016.

- [43] C. Neves, O. Faria, R. Rotondaro, P. Cevallos, M. Hoffmann, Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo, PROTERRA. (2010).
- [44] M. Fernandes, Técnicas de construção em terra, Terra Forma Construir 10^a Mesa Redon. Primav. Arquit. Antropol. Arqueol. Univ. Coimbra. (2006) 20–25.
- [45] M. Mendes, Diário de Campo - Curso de construção com terra e de formação de formadores, Mumento, Moçambique, (2006).
- [46] S. Colin, Coisas da Arquitetura- Técnicas construtivas do período colonial- I, (n.d.). <https://coisasdaarquitetura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-i/> (accessed October 1, 2019).
- [47] V. Maniatidis, P. Walker, A review of rammed earth construction, Nat. Build. Technol. Group, Dep. Archit. Civ. Eng. , Univ. Bath. (2003).
- [48] SENCICO, Norma técnica de edificación NTE E 080 Adobe, Lima, Peru, (2000).
- [49] J. Chumbinho, Otimização de solos para a produção de blocos de terra compactada, Dissertação de Mestrado, Departamento de Geociências, Escola de Ciências e Tecnologias, Universidade de Évora, 2017.
- [50] Compressed Earth Blocks Standards, (1998). <http://www.nzdl.org/gsdldmod?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-0utfZz-8-00&a=d&c=cdl&cl=CL1.60&d=HASH01979938ef89e979ddfb736b.7.2> (accessed October 20, 2019).
- [51] G. Quintino, Blocos de terra compactada. Arquitetura de terra em Portugal, Editora Argumentum ISBN: 972-8479-36-0, 2005.
- [52] J. Ferraz, Equipamentos modernos para a produção de tijolos de terra prensada, In: Workshop Arquitetura de Terra, São Paulo: NUTAU-FAUUSP, 1995.
- [53] LNEC E 239, Especificação LNEC - Solos: Análise granulométrica por peneiração húmida, Laboratório Nac. Eng. Civ. - Port. (1970).
- [54] LNEC E 196, Especificação LNEC - Solos: análise granulométrica, Laboratório Nac. Eng. Civ. - Port. (1966).
- [55] LNEC E 197, Especificação LNEC - Ensaio de compactação, Laboratório Nac. Eng. Civ. - Port. (1966).
- [56] NP EN 143, Norma Portuguesa - Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ - Inst. Port. Da Qual. (1969).
- [57] NP EN 933-9, Norma Portuguesa - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 9: Determinação do teor de finos: Ensaio do azul de metileno, IPQ - Inst. Port. Da Qual. (2002).
- [58] NP EN 933-8, Norma Portuguesa - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio de equivalente de areia, IPQ - Inst. Port. Da Qual. (2002).
- [59] NP EN 772-1, Norma Portuguesa - Métodos de ensaios de blocos para alvenaria - Parte 1: Determinação da resistência à compressão, IPQ - Inst. Port. Da Qual. (2002).
- [60] NP EN 12504-4, Norma Portuguesa - Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, IPQ - Inst. Port. Da Qual. (2007) 18.
- [61] LNEC E 394, Especificação LNEC - Determinação da absorção de água por imersão, Laboratório Nac. Eng. Civ. - Port. (1993).
- [62] LNEC E 393, Especificação LNEC - Determinação da absorção de água por capilaridade, Laboratório Nac. Eng. Civ. - Port. (1993).
- [63] NZS 4298, Norma da Nova Zelândia - Materials and workmanship for earth buildings, New Zeal. Tech. Committe. (1998) 91.
- [64] M. Rezende, R. Eires, A. Camões, C. de Jesus, Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para teste acelerado de degradação, Eng. Civ. Da Univ. Do Minho.

- (2016) 17–28.
- [65] J. Sitton, Y. Zeinali, B. Story, Rapid soil classification using artificial neural networks for use in constructing compressed earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 138 (2017) 214–221. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.006.
- [66] M. Gutierrez, Comparação entre métodos de análise granulométrica de sedimentos: precisão, Trabalho de Graduação, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2009.
- [67] ABNT NBR 15575, Edificações habitacionais – Desempenho, Assoc. Bras. Normas e Técnicas. (2013).
- [68] P. Giorgi, G. Grigoletti, R. Lima, L. Lorenzi, Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575, *Matéria* (Rio Janeiro). 23 (2018). doi:10.1590/s1517-707620180003.0511.
- [69] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux, *CRATerre, Building with earth, CRATerre, França, France, 1985.*
- [70] DIN 18127, Soil, investigation and testing - Proctor - test, Alemanha, 2012.
- [71] M. Varela, Limites de consistência, (n.d.).
- [72] J.L. Velho, M. Quinta-Ferreira, A. Veiga, C. Amado, Análise da aplicação dos ensaios de azul de metileno e de identificação em solos, *Ciências Da Terra. VI Congr. Nac. Geol. Especial V* (2003) CD-ROM G42-G45.
- [73] B. Voth, *Boden, baugrund und baustoff*, (1978).
- [74] Y. Yukselen, A. Kaya, Suitability of the methylene blue test for surface area , cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils, *Eng. Geol.* 102 (2008) 38–45. doi:10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
- [75] P. Arab, T. Araújo, O. Pejon, Applied clay science identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests, *Appl. Clay Sci.* 114 (2015) 133–140. doi:10.1016/j.clay.2015.05.020.
- [76] N. Poerschke, Relatório determinação do equivalente de areia, Relatório 05. (2016). <http://www.ebah.pt/content/ABAAAhGI8AF/relatorio-determinacao-equivalente-areia> (accessed October 1, 2019).
- [77] NBR 8491, Especificação- Tijolo maciço de solo-cimento, Rio de Janeiro, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS. (1984).
- [78] J. González-López, C. Juárez-Alvarado, B. Ayub-Francis, J. Mendoza-Rangel, Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 179–188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074.
- [79] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, R. Chebili, Durability of lime stabilized earth blocks, *Dep. Civ. Eng. Univ. Biskra Constantine, Alger.* (2002) 61–66.
- [80] M. Mansour, A. Jelidi, A. Cherif, S. Jabrallah, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 44–51. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024.
- [81] L. Medas, Inspeção, diagnóstico e reparação de estruturas de betão armado, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [82] E. Teixeira, High Volume Coal and Biomass Fly Ash Eco-Efficient Concrete, Tese de Douturamento, Departamento de Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2019.
- [83] J. Cid-Falceto, Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción, Tese de Douturamento, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidade Politecnica de Madrid, 2012.
- [84] F. Galídez, Compressed earth blocks (CEB) with no added cement, *Segur. y Medio*

- Ambient. - N° 115. (2009) 1–15.
- [85] A. Lawane, J. Minane, R. Vinai, A. Pantet, Mechanical and physical properties of stabilised compressed coal bottom ash blocks with inclusion of lateritic soils in, 6 (2019). doi:10.1016/j.sciaf.2019.e00198.
- [86] NBR 8492, Especificação - Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção de água, Método de ensaio, Assoc. Bras. Normas e Técnicas. (1984).
- [87] H. Houben, H. Guillaud, Construction, CRATerre/ PGC / CRA / UNCHS / AGCD, 1984.
- [88] J. Cid-falceto, F. Mazarrón, I. Cañas, Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests, Constr. Build. Mater. 37 (2012) 738–745. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019.