



Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios

Miguel Francisco Costa Granja Da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Orientadora: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Outubro 2015

Resumo

A terra é dos materiais de construção mais antigos do mundo, tendo sido progressivamente abandonada com o aparecimento de outros materiais correntes, como o betão, o aço e o tijolo cerâmico. No entanto, a utilização da terra pode ter inúmeras vantagens no que se refere ao seu custo, à sua capacidade de isolamento térmico e acústico, ao seu impacto mínimo no ambiente e, sobretudo, à sua acessibilidade. Na procura de um crescimento sustentável, a construção em terra assume-se como uma mais-valia para o setor da construção. Desta forma, a construção em terra está a conquistar progressivamente o mercado de construção dos países denominados “desenvolvidos”, devido à industrialização da produção e dos processos de construção com este material. Os blocos de terra compactados (BTC) surgem como a técnica de construção em terra com maior perspectiva de aceitação pelas sociedades atuais, dado que a sua tecnologia permite a standardização dos blocos e um maior controlo de qualidade no seu processo de produção. No entanto, aliado à falta de regulamentação (caso de Portugal) ou à falta de compatibilidade entre a escassa regulamentação existente, as incertezas associadas ao comportamento dos BTC são os maiores entraves para a sua aceitação universal. Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização das principais propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos BTC.

Para tal, foi efetuada uma campanha experimental que envolveu a seleção e caracterização de várias terras e ainda a produção e caracterização de BTC não estabilizados e estabilizados com materiais cimentícios. A terra selecionada foi corrigida granulometricamente com um agregado reciclado resultante da demolição de obras. Foram formuladas três composições distintas: uma mistura não estabilizada (N); uma mistura estabilizada com 8%, em massa, de cimento (C); uma mistura estabilizada com 4%, em massa, de cimento e de cal, respetivamente (M). Os blocos produzidos foram acondicionados em ambientes de humidade e temperatura distintas de modo a avaliar a influência da humidade nas propriedades investigadas. Analisou-se os BTC no seu estado seco, saturado, húmido (humidade relativa superior a 90%) e em ambiente de laboratório (humidade relativa entre cerca de 55% e 75%). Os BTC foram caracterizados no seu estado fresco (massa volúmica) e no seu estado endurecido (porosidade, massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por flexão e por compressão diametral, velocidade de propagação de ultrassons, condutibilidade térmica, permeabilidade à água, absorção de água por imersão e por capilaridade e resistência à erosão por ação da água por gotejamento e por jato de água sobre pressão).

A análise dos resultados obtidos revela que a estabilização dos BTC é vantajosa no que se refere à sua resistência mecânica e essencial no que se refere à sua durabilidade, sobretudo em condições em que seja previsível o seu contacto com a água. A estabilização dos BTC com cimento demonstrou um desempenho muito superior face à estabilização com uma mistura de cimento e cal. Constata-se ainda, que o teor de humidade dos BTC influencia significativamente as suas principais propriedades, sobretudo a sua resistência mecânica.

Palavras-chave: Bloco de terra compactado; sustentabilidade; resistência mecânica; durabilidade

Abstract

Earth is the oldest building material in the world, however it has fallen into disuse with the discovery of modern day building materials like concrete, steel, fired bricks, etc. None the less, earth as a material, has many advantages, such as cost, thermal and acoustic insulation, minimal impact on the environment and its easy accessibility. The growing search for sustainable construction makes earth construction techniques a must. This is why, earth construction is on the rise in so called “developed” countries, as its production and construction techniques are viable to be industrialised. It is expected that compressed earth blocks (CEB), are the earth construction technique most likely to be accepted by modern society. This is due to the CEB technology, enabling the blocks to be standardized and greater control over the quality of its production cycle being achieved. Despite all this, and adding to the lack of normative regulation, in Portugal’s case, or lack of compatibility between existing normative regulation, the numerous uncertainties associated with the behaviour of CEB, are the main reasons for its dismissal as an acceptable building material. Therefore, the main objective of this study is to characterize the mechanical, physical and durability properties of CEB.

In order to do so, an experimental study was conducted, involving the selection and characterization of soils, as well as, the production and characterization of stabilized and unstabilized CEB. A recycled aggregate derived from construction debris, was added to the selected soil to better its granulometry. The following types of blocks were produced: unstabilized CEB (N); stabilized CEB with 8% of cement, in weight (C); stabilized CEB with 4% of cement and lime, each, in weight (M). The blocks were stored under different humidity and temperature conditions in order to study the influence that moisture has on the block properties. The CEB were tested dry, saturated, humid (over 90% relative humidity) and in laboratorial conditions (relative humidity ranging from 55% to 75%). The CEB were characterized in their fresh state (density) and in their hardened state (porosity, dry density, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, ultrasonic velocity, thermal conductivity, water permeability, water absorption, capillary water absorption, resistance to water erosion)

This study reveals that stabilization increases the mechanical strength of the CEB, and is fundamental in assuring adequate durability to the CEB, especially in situations where contact with water is unavoidable. Cement stabilization was determined to be superior to lime stabilization in CEB. The test results demonstrated the great impact that humidity has on the behaviour of CEB.

Key words: Compressed earth block; sustainability; mechanical strength; durability

Agradecimentos

Esta é a última página que escrevo desta longa caminhada.....como esta página não é avaliada, vou evitar formalidades e escrever o que sinto apenas!

Em primeiro lugar tenho que agradecer aos meus pais Manny Da Silva (Boss) e Xanda Da Silva (Ma) pelo amor incondicional que têm por mim. Devo grande parte do homem que sou a eles. As minhas irmãs, agradeço por todos os momentos felizes que vivemos juntos, que sem eles a vida não era a mesma coisa. Aos meus avós Luis Granja e Clara Granja agradeço a sua total disponibilidade em me ajudar ao longo dos meus anos de faculdade. À minha avó Luiza Costa (Lu) agradeço por todo o otimismo e força que me transmitiu durante os meus estudos. Amo-vos a todos!

Ao Professor Doutor José Alexandre Bogas, tenho que agradecer toda a sua disponibilidade, conhecimento, experiência, paciência, apoio moral e puxões de orelha quando necessário. Ganhei um enorme respeito e admiração por si, a sua ética de trabalho é inspiradora. Sem a sua ajuda, dificilmente teria aprendido tanto como aprendi com esta tese. Um muito obrigado e um grande abraço.

Ao Arquiteto Nuno Grenha, agradeço em primeiro lugar a sua disponibilidade e a sua amizade. Sem a sua experiência esta tese nunca teria “pernas para andar”. Contribuiu com o sucesso de todo o processo de produção dos BTC, proporcionando experiências que me ficarão para a vida. À malta de Montemor: Duarte, Robson, Peixe...um grande abraço. Trabalho duro com muitas gargalhadas!

A todos os técnicos do laboratório do IST, especialmente ao Sr. Leonel e ao João Lopes, um muito obrigado por todas as ajudas e “ajudinhas” que me facultaram ao longo da extensa campanha experimental. Por todos os Macgyver’s a que chegamos.

Aos meus amigos mais próximos, um obrigado pela força que me transitaram, pela amizade verdadeira e pela partilha do meu “stress”. Vocês são muitos para enumerar, mas tenho que deixar aqui um grande abraço ao Diogo Serpa, o verdadeiro companheiro desta caminhada épica – que as nossas vidas continuem a tomar rumos que cruzem!

À minha Patricia deixo um grande beijo e um grande obrigado pelas vezes que me obrigou a trabalhar na tese, querendo sempre o melhor para mim. Amo-te 4 metros acima do céu Jeitosa.

À Isabel Lopes agradeço toda a amizade, ajuda e companheirismo em momentos de pura frustração e “seca” com os nossos BTC’s. Nunca nós pensávamos que isto ia dar tanto trabalho!

Do not go where the path may lead, go instead where there is no path and leave a trail.

Siglas / Acrónimos

a/c – Relação água / cimento

A_f – Areia fina

BTC – Bloco de terra compactada

C – BTC estabilizados com 8% de cimento, em relação à massa seca da mistura TNR

HR – Humidade relativa

Hu – Humidade de ensaio, em ambiente com cerca de 20°C e HR superior a 90%

IP – Índice de plasticidade

Lb – Humidade de ensaio laboratorial, em ambiente com cerca de 19-26°C e HR de 55-75%

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

M – BTC estabilizados com 4% de cimento e 4% de cal, em relação à massa seca da mistura TNR

N – BTC não estabilizados

R – Agregado reciclado proveniente de Montemor-o-Novo

Se – Humidade de ensaio seco

St – Humidade de ensaio saturado

TA – Terra proveniente de Montemor-o-Novo, designada terra “clara”

TE – Terra proveniente de Montemor-o-Novo, designada terra “escura”

TN – Terra proveniente de Montemor-o-Novo, designada terra “neutra”

TOA – Teor ótimo em água

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Considerações iniciais.....	1
1.2.	Motivação e objetivos	2
1.3.	Metodologia e organização da dissertação.....	3
2.	A construção em terra e os BTC	5
2.1.	Aplicação da terra na construção.....	5
2.2.	Propriedades e características da terra como material de construção	7
2.2.1.	Propriedades fundamentais da terra	8
2.2.2.	Características da terra	8
2.2.3.	Argila e suas propriedades	9
2.2.4.	Parâmetros de caracterização da terra	10
2.2.5.	Propriedades higrotérmicas	12
2.2.6.	Potencialidades e limitações da terra como material de construção	12
2.3.	Estabilização do solo	13
2.3.1.	Estabilização física	14
2.3.2.	Estabilização mecânica	15
2.3.3.	Estabilização química	15
2.4.	Técnicas de construção em terra	17
2.4.1.	Adobe	18
2.4.2.	Taipa	19
2.4.3.	Terra ensacada	21
2.5.	Blocos de terra compactada (BTC)	23
2.5.1.	Contexto histórico	23
2.5.2.	Características dos BTC.....	24
2.5.3.	Produção de BTC	24
2.5.4.	Processo de construção de alvenarias com BTC	27
2.5.5.	Vantagens e desvantagens dos BTC	29
2.6.	Regulamentação da construção em terra, e com os BTC.....	30
2.6.1.	A necessidade da regulamentação da construção em terra	30
2.6.2.	Estado atual da regulamentação para as construções em terra.....	30
2.6.3.	Principal conteúdo da regulamentação das construções em terra	31
2.6.4.	Conclusões.....	32

2.7.	Formulação dos BTC.....	32
2.8.	Propriedades dos BTC.....	34
2.8.1.	Propriedades mecânicas.....	34
2.8.2.	Propriedades físicas.....	39
2.8.3.	Durabilidade	41
3.	Campanha experimental	47
3.1.	Descrição geral da campanha experimental	47
3.2.	Materiais constituintes.....	47
3.2.1.	Caracterização dos materiais constituintes.....	48
3.2.2.	Apresentação e discussão de resultados	53
3.3.	Produção de misturas experimentais.....	55
3.3.1.	Considerações gerais	55
3.3.2.	Critério de comparação	55
3.3.3.	Resumo de resultados	55
3.4.	Composições dos BTC.....	56
3.5.	Produção dos BTC.....	57
3.5.1.	Considerações iniciais.....	57
3.5.2.	Processo de produção	58
3.6.	Caracterização dos BTC – Procedimentos de ensaio.....	62
3.6.1.	Determinação da resistência à compressão.....	64
3.6.2.	Resistência à tração por flexão.....	66
3.6.3.	Resistência à tração por compressão diametral	68
3.6.4.	Massa volúmica	69
3.6.5.	Ensaio de medição de velocidade de propagação de ultrassons.....	70
3.6.6.	Condutibilidade térmica	71
3.6.7.	Permeabilidade à água	72
3.6.8.	Absorção de água por imersão.....	74
3.6.9.	Absorção de água por capilaridade	75
3.6.10.	Erosão por gotejamento (drip test).....	77
3.6.11.	Erosão acelerada (spray test)	78
4.	Apresentação e discussão de resultados	81
4.1.	Considerações iniciais.....	81
4.2.	Massa volúmica fresca	81
4.3.	Porosidade total	82

4.4.	Massa volúmica no estado endurecido.....	84
4.5.	Resistência mecânica.....	87
4.5.1.	Resistência à compressão.....	87
4.5.2.	Resistência à tração.....	94
4.6.	Velocidade de propagação de ultrassons ($V_{\mu s}$).....	97
4.7.	Condutibilidade térmica.....	99
4.8.	Durabilidade.....	101
4.8.1.	Permeabilidade à água.....	102
4.8.2.	Absorção de água por imersão.....	103
4.8.3.	Absorção de água por capilaridade.....	105
4.8.4.	Erosão por gotejamento (drip test).....	108
4.8.5.	Erosão acelerada (spray test).....	110
4.8.6.	Outros indicadores de durabilidade.....	114
5.	Conclusões.....	117
5.1.	Considerações finais.....	117
5.2.	Conclusões gerais.....	117
5.2.1.	Propriedades gerais dos materiais constituintes.....	117
5.2.2.	Propriedades gerais dos BTC.....	118
5.3.	Propostas de desenvolvimento futuro.....	122
	Referências Bibliográficas.....	125
	Anexos.....	A
	Anexo I.....	B
	Anexo I.I - Informação complementar da resistência à compressão em BTC.....	B
	Anexo II.....	C
	Anexo II.I - Resultado gráfico dos ensaios de limites de consistência das terras.....	C
	Anexo II.II - Curvas de compactação das terras ensaiadas.....	C
	Anexo III.....	D
	Anexo III.I - Humidades de produção dos BTC – Mistura não estabilizada (drop test).....	D
	Anexo III.II - Humidades de produção dos BTC – Mistura estabilizada C (drop test).....	D
	Anexo III.III - Humidades de produção dos BTC – Mistura estabilizada M (drop test).....	D

Anexo III.IV - Resultados do ensaio da massa volúmica de produção dos BTC.....	E
Anexo III.V - Determinação da porosidade dos BTC.....	F
Anexo III.VI - Resultados do ensaio de massa volúmica dos BTC.....	F
Anexo III.VII - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura C.....	G
Anexo III.VIII - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura M.....	G
Anexo III.VIX - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura N.....	H
Anexo III.X - Resultado do ensaio de compressão diametral.....	H
Anexo III.XI - Resultado do ensaio de tração por flexão (ambiente laboratorial).....	I
Anexo III.XII - Resultados do ensaio de medição da velocidade de propagação de ultrassons....	I
Anexo III.XIII - Resultados do ensaio de condutibilidade térmica dos BTC.....	J
Anexo III.XIV - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	J

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplos de construção em terra.....	5
Figura 2 - Cidade de Shibān, Iêmen (Webodysseum, 2012)	6
Figura 3 - Construção tradicional Portuguesa em terra	7
Figura 4 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra	7
Figura 5 – Curvas de compactação.....	11
Figura 6 - Desmoldagem de blocos de adobe (Picorelli, 2011).	18
Figura 7 - a) Parede de adobe em construção. b) Produção mecânica de Adobe (Rael, 2009).	19
Figura 8 – Exemplos de construção em taipa.....	20
Figura 9 - a) Taipal e pilão tradicionais (Eusébio, 2001). b) Construção em taipa moderna.	21
Figura 10 - Exemplos de cúpulas em terra ensacada (Geiger et al., 2014).	21
Figura 11 – Construção em terra ensacada.....	22
Figura 12 - Exemplos de construções em BTC:.....	23
Figura 13 – a) Prensa Cinvaram (Barbosa, 1996). b) Prensa testaram.....	23
Figura 14 - Equipamento e material de produção.	25
Figura 15 - a) e b) Dosagem dos materiais. c) Mistura dos materiais	26
Figura 16 - a) Dosagem da mistura. b) Colocação da mistura na prensa. c) Moldagem do bloco.	26
Figura 17 - Cura dos blocos: Blocos tapados com lona plástica após rega com água.....	27
Figura 18 - Processo de construção em BTC: levantamento das paredes	28
Figura 19 - Processo de construção em BTC: a) Viga de coroamento. b) Telhado.....	28
Figura 20 - Equipamento utilizado para a análise granulométrica	49
Figura 21 - Equipamento utilizado para a determinação dos limites de consistência.....	49
Figura 22 - Ensaio de determinação dos limites de consistência.....	50
Figura 23 - Ensaio de determinação da massa volúmica das partículas.	51
Figura 24 - Várias fases do ensaio Proctor com diferentes amostras de terras.....	52
Figura 25 - a) Reação entre terra e H ₂ O ₂ . b) Amostra de terra após secagem em estufa.....	53
Figura 26 - Curvas granulométricas das terras analisadas	54
Figura 27 - Esquema ilustrativo do drop test (Hydraform, 2006)	59
Figura 28 - Processo de recolha de amostra de mistura húmida (teor de humidade de produção)	59
Figura 29 - Pormenores na moldagem dos BTC	60
Figura 30 - Designação das faces dos blocos.....	60
Figura 31 - Cura dos blocos	61
Figura 32 - Equipamento dos ensaios mecânicos	64

Figura 33 - Condicionamento dos provetes	65
Figura 34 – Provetes rejeitados.....	65
Figura 35 - Ensaio de compressão.....	66
Figura 36 - a) Dispositivo de flexão com o provete centrado. b) Provede após ensaio de flexão.....	67
Figura 37 – Esquema de ensaio de resistência à compressão diametral (vista frontal e lateral).	68
Figura 38 - Exemplificação da rotura dos provetes por compressão diametral.	68
Figura 39 - Pesagem de blocos de referência (frescos).....	70
Figura 40 - Ensaio de ultrassons.....	71
Figura 41 - a) Ensaio em bloco saturado. b) ISOMET 2114	72
Figura 42 - Ensaio de permeabilidade	73
Figura 43 – Preparação, pintura e imersão em água dos provetes.....	73
Figura 44 - a) Blocos C e M submersos. b) Blocos C e M a secar na estufa ventilada.....	74
Figura 45 - Procedimento do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	76
Figura 46 - Procedimento do ensaio de erosão por gotejamento.	78
Figura 47 - Erosão acelerada	78
Figura 48 - Procedimento do ensaio de erosão acelerada:.....	79
Figura 49 - Comparação das massas volúmicas secas com as reportadas por outros autores.....	85
Figura 50 - Representação gráfica das massas volúmicas dos provetes ensaiados	87
Figura 51 - Resistência à compressão (28 dias) reportado por outros autores	89
Figura 52 - Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes humidades de ensaio.....	90
Figura 53 - Evolução temporal da resistência à compressão	92
Figura 54 – Propriedades dos BTC.....	94
Figura 55 – Resistência à tração	95
Figura 56 - Tração por compressão diametral	95
Figura 57 - Gráfico de comparação entre as resistências mecânicas dos BTC	97
Figura 58 - Representação gráfica das velocidades de propagação de ultrassons nos BTC	98
Figura 59 - Representação gráfica da condutibilidade térmica dos BTC.....	100
Figura 60 - Relação entre a porosidade capilar (%) e a permeabilidade de pastas de cimento	103
Figura 61 - Absorção de água da mistura C em comparação com o reportado por outros autores ..	104
Figura 62 - Evolução temporal da absorção capilar nas misturas estabilizadas	106
Figura 63 – Ensaio de absorção capilar.	106
Figura 64 - C_b dos BTC em comparação com os C_b reportados por outros autores.....	107
Figura 65 - Efeito do gotejamento nos blocos da mistura N.....	110
Figura 66 – Erosão acelerada - misturas estabilizadas.....	112
Figura 67 – Erosão acelerada - mistura não estabilizada	112

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Técnicas de construção em terra segundo a CRATerre.....	18
Tabela 2 - Características gerais da terra para a produção de BTC.....	33
Tabela 3 - Características da terra para a produção de BTC	33
Tabela 4 - Incorporação de estabilizadores em BTC	34
Tabela 5 – Resistência média à compressão de BTC, reportado por diferentes autores	37
Tabela 6 – Resistência à tração por flexão de BTC reportado por diferentes autores	38
Tabela 7 - Resistência à tração por compressão diametral de BTC (diferentes autores)	39
Tabela 8 - Massa volúmica seca de BTC reportado por diferentes autores.....	40
Tabela 9 - Condutibilidade térmica de BTC reportado por diferentes autores.....	41
Tabela 10 - Permeabilidade de BTC (Bahar et al. 2004).....	42
Tabela 11 - Absorção de água em BTC reportado por diferentes autores.....	43
Tabela 12 - Profundidade de erosão pelo ensaio de gotejamento (diferentes autores).....	44
Tabela 13 - Profundidade de erosão pelo ensaio de erosão acelerada (diferentes autores)	45
Tabela 14 - Ensaio de caracterização e respetivos documentos normativos consultados.	48
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados	54
Tabela 16 - Misturas experimentais e a sua simbologia	55
Tabela 17 – Parâmetros e escala de comparação entre as misturas experimentais.	55
Tabela 18 – Resultados da produção dos blocos experimentais.	56
Tabela 19 – Ensaio de caracterização dos BTC e respetivos documentos normativos	62
Tabela 20 - Informação sobre o condicionamento dos provetes nos ensaios realizados.....	62
Tabela 21 - Condições de realização dos ensaios de caracterização dos BTC.....	63
Tabela 22 - Classificação dos blocos de acordo com a profundidade de erosão (Drip test).....	77
Tabela 23 - Classificação dos blocos segundo a profundidade de erosão (Sray test).....	80
Tabela 24 – Resultados médios da massa volúmica fresca.....	82
Tabela 26 – Porosidade dos BTC comparado com valores reportados por outros autores.	83
Tabela 27 - Massa volúmica dos BTC no estado endurecido	85
Tabela 28 - Resultados médios do ensaio de resistência à compressão.....	88
Tabela 29 – Evolução temporal da resistência à compressão.....	93
Tabela 30 - Resultados médios dos ensaios de resistência à tração.....	95
Tabela 31 - Comparação entre velocidades de propagação de ultrassons com valores reportados ...	99
Tabela 32 - Resultados médios do ensaio de medição da condutibilidade térmica dos BTC	100
Tabela 33 - Resultados do ensaio de permeabilidade.....	102

Tabela 34 - Absorção de água dos BTC.....	104
Tabela 35 – Coeficientes médios de absorção de água por capilaridade.	105
Tabela 36 - Comparação de resultados dos ensaios de absorção de água.	108
Tabela 37 - Resultados do ensaio de erosão por gotejamento, mistura N (3.7.3.4).....	109
Tabela 38 - Resultados do ensaio de erosão acelerada, mistura N.	113
Tabela 39 - Resistência à compressão como indicador de durabilidade dos BTC.....	115

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

A terra é utilizada como material de construção desde os primórdios da humanidade. A necessidade do Homem em se proteger do ambiente levou o mesmo a procurar abrigos naturais, como grutas, e futuramente a construir abrigos próprios com elementos como a terra, palha, madeira, fibras naturais, pedra, entre outros. Estima-se que cerca de 30 a 50% da população mundial vive em habitações de terra (Kakizawa, 2007; Little et al., 2001; Pacheco-Torgal et al., 2009). A maior expressão da construção em terra encontra-se nos países em desenvolvimento (Continente Africano, América Central, Médio Oriente). No entanto, praticamente todas as nações mundiais tem alguma tradição de construção em terra.

Os primeiros vestígios da utilização de terra na construção em Portugal surgem aproximadamente no ano 5000 a.C. (Gomes, 2005). As três técnicas de construção em terra (2.3) mais utilizadas no território Nacional são a taipa, o adobe e o tabique (Silva et al., 2013). A maioria da construção em terra nacional distribui-se pelo centro e sul do território devido à distribuição dos recursos naturais (pedra, madeira, solo argiloso), consistindo sobretudo na taipa e no adobe. A construção em blocos de terra compactados (BTC) foi pouco difundida, visto que a sua invenção nos anos 50, na Colômbia, coincidiu com o abandono das técnicas de construção em terra em Portugal (Lourenço, 2002).

As potencialidades da terra como material de construção são inúmeras. É uma matéria-prima abundante e fácil de extrair e utilizar sem equipamentos complexos, cujo custo associado é reduzido. A sua extração e utilização não danificam os ecossistemas envolventes, não libertam dióxido de carbono e têm um consumo energético reduzido. As propriedades higrotérmicas da terra proporcionam um bom isolamento térmico e acústico, uma autorregulação do teor de humidade no interior das construções e ainda uma elevada resistência ao fogo. A construção em terra permite conservar a tradição da construção mundial, e ainda apresenta enormes possibilidades arquitetónicas. Assim, a terra apresenta-se como uma solução construtiva acessível às populações carenciadas e sobretudo, uma solução construtiva sustentável, sendo o seu principal obstáculo, a fraca resistência à água.

Os BTC podem ser considerados como sendo a evolução dos blocos de adobe devido à compactação do material durante a sua produção. Para além da melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade face ao adobe, a compactação do material confere aos BTC uma elevada estabilidade dimensional, um acabamento liso e a possibilidade de aplicação em obra, sem necessidade de revestimento. Os BTC têm ainda a vantagem de poderem ser transportados e empilhados no seu estado fresco (imediatamente após a desmoldagem), pelo que ocupam menor espaço de armazenagem que o adobe. A tecnologia dos BTC permite a standardização dos blocos, revelando uma maior aceitação desta técnica de construção em terra pelas sociedades que

empreguem as técnicas de construção com blocos de betão ou alvenaria de tijolo. Os BTC podem ter funções estruturais, capacidade autoportante, ou ser utilizados como material de enchimento e é pratica comum recorrer-se à estabilização da terra com diferentes produtos, sendo os mais comuns o cimento e a cal.

1.2. Motivação e objetivos

A sustentabilidade é um assunto muito em voga nos tempos atuais devido aos impactes devastadores que o Homem tem vindo a causar no ecossistema com vista a satisfazer as suas necessidades. A construção em terra, nomeadamente os BTC, é deste modo uma mais-valia para a sustentabilidade da industria da construção e por consequência um desenvolvimento mais sustentável do Homem. Dado a heterogeneidade do material “terra”, a influência da composição e do processo de produção dos BTC, existem inúmeras incertezas associadas ao comportamento dos BTC. A incerteza associada à durabilidade dos BTC é um dos seus maiores entraves para a sua aceitação na sociedade atual.

Neste contexto, a presente dissertação, desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, teve como objetivo a caracterização das principais propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos BTC. É também objetivo deste trabalho avaliar a eficácia de diferentes agentes estabilizadores utilizados na formulação dos BTC, bem como, analisar a influência do teor de humidade nas suas principais propriedades.

Deste modo, no presente trabalho procedeu-se à caracterização de BTC não estabilizados e estabilizados com materiais cimentícios. Os resultados obtidos nos BTC não estabilizados foram comparados com os obtidos nos BTC estabilizados, de modo a avaliar a vantagem decorrente da estabilização dos BTC. Foram analisadas e caracterizadas várias terras para a produção de BTC e avaliou-se o desempenho do cimento e da cal como agentes estabilizadores. Os blocos produzidos foram armazenados em ambientes com humidades distintas de modo a aferir a influência do teor de humidade nas principais propriedades dos BTC. Com vista a avaliar em maior detalhe as principais propriedades dos BTC, sempre que possível, os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com os reportados por outros autores na literatura consultada. Na formulação dos BTC incluiu-se um agregado reciclado (R) proveniente da demolição de obras, por forma a corrigir a granulometria da terra selecionada (TN) e em simultâneo dar utilização a um resíduo da construção, reforçando o potencial sustentável desta solução construtiva. Assim, de forma resumida, foram produzidos BTC com as 3 composições seguintes:

- Mistura N – BTC não estabilizado com: 85% de terra e 15% de agregado reciclado;
- Mistura C – BTC estabilizado com: 85% de terra, 15% de agregado reciclado e adição de 8% de cimento (% em massa da terra);
- Mistura M – BTC estabilizado com: 85% de terra, 15% de agregado reciclado, e adição de 4% de cimento e de 4% de cal (% em massa da terra);

Neste trabalho os BTC foram caracterizados mecanicamente por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por flexão e por compressão diametral. Foi ainda avaliado a sua porosidade, massa volúmica, condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultrassons. Dado a relevância do comportamento dos BTC em contacto com a água, foi também analisada a sua durabilidade, nomeadamente no que concerne às suas principais propriedades de transporte e à resistência à ação da água. Assim, avaliou-se a permeabilidade à água, a absorção de água por imersão e por capilaridade e a resistência à erosão por ação da água, quer por gotejamento, quer por jato de água sobre pressão (erosão acelerada).

1.3. Metodologia e organização da dissertação

A metodologia adotada ao longo do presente trabalho pode ser dividida em quatro etapas distintas. A primeira etapa consistiu na pesquisa, recolha e posterior processamento de informação bibliográfica referentes à construção em terra, sobretudo focado nos BTC. Esta etapa teve como objetivo avaliar o estado atual de conhecimento e compreender as propriedades do material por forma a planificar a campanha experimental e analisar os resultados obtidos na mesma.

A segunda etapa compreendeu a elaboração de um plano referente, não só à produção das misturas, como também aos ensaios a executar de caracterização dos materiais constituintes e dos BTC com eles produzidos.

A terceira etapa refere-se à execução da campanha experimental, que se processou em 5 fases: seleção e caracterização dos materiais constituintes; produção de blocos experimentais; formulação e definição das composições dos BTC; produção dos BTC; caracterização dos BTC no estado fresco e no estado endurecido segundo os ensaios definidos na segunda etapa.

Finalmente, procedeu-se à análise e discussão dos resultados obtidos na terceira etapa, onde se procurou caracterizar as propriedades físicas mecânicas e de durabilidade dos BTC produzidos.

Em termos de organização, a redação do presente trabalho encontra-se estruturada conforme os seguintes capítulos:

Capítulo 1: Este capítulo introduz o âmbito do presente trabalho, referindo-se os motivos e os objectivos pretendidos, bem como a estrutura e organização da dissertação.

Capítulo 2: Este capítulo remete para o estado da arte do presente tema, consistindo na pesquisa bibliográfica realizada, que compreende a caracterização do material, o estudo das suas propriedades e uma análise crítica dos resultados obtidos por outros autores.

Capítulo 3: Este capítulo descreve e ilustra os ensaios realizados aos materiais constituintes, bem como aos blocos no estado fresco e no estado endurecido. São ainda apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes, a formulação das composições dos BTC e o processo de produção adotado.

Capítulo 4: Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos BTC no estado fresco e no estado endurecido, bem como a análise e discussão dos mesmos.

Capítulo 5: Este capítulo resume as principais conclusões da análise efetuada no Capítulo 4, apresentando-se também algumas propostas para desenvolvimentos futuros, que têm em vista um melhor domínio do conhecimento das construções em BTC.

Por ultimo, todas as referências bibliográficas consultadas, assim como todos os anexos referenciados ao longo do trabalho são apresentados em dois capítulos adicionais no final do presente documento.

2. A construção em terra e os BTC

2.1. Aplicação da terra na construção

A terra é utilizada como material de construção desde os primórdios da humanidade. A necessidade do Homem em se proteger do ambiente levou o mesmo a procurar abrigos naturais como grutas, e futuramente a construir abrigos próprios com elementos da natureza. Os primeiros materiais de construção foram a terra, palha, madeira, fibras naturais, pedra, entre outros.

Apesar de não se ser consensual, acredita-se que as primeiras construções em terra têm início com as primeiras sociedades agrícolas entre 12000 e 7000 a.C.. Existem inúmeros exemplos de construções antigas em terra que sobreviveram até à atualidade, como algumas pirâmides do Antigo Egito ou da América Central. Troços extensos da Grande Muralha da China foram construídos em taipa, há aproximadamente 3000 anos atrás (Figura 1) (Pacheco-Torgal et al., 2009).

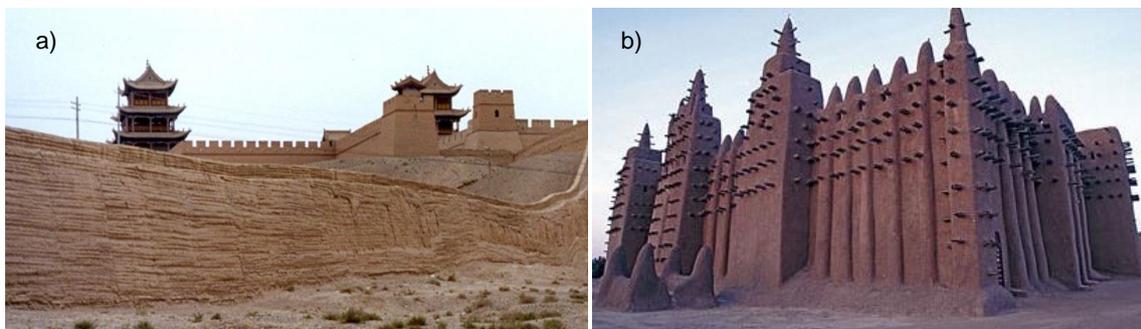


Figura 1 – Exemplos de construção em terra: a) Troço em taipa da Grande Muralha da China. b) Mesquita de Djenné, Mali (UNESCO 2014).

A UNESCO classificou como património mundial alguns conjuntos arquitetónicos construídos em terra como as ruínas da cidade de Chanchán no Peru (Séc. XV), a aldeia de Ait-Bem-Haddou em Marrocos (Séc. XVII), a Mesquita de Djenné no Mali e a cidade de Shibān no Iêmen (UNESCO, 2014). A Mesquita de Djenné é considerada uma das construções mais icónicas do continente Africano, reconstruída em adobe no ano 1906. O adobe é revestido com um reboco de terra e tem cerca de 5600 m² com a sua torre principal a atingir os 16 metros de altura (Figura 1). A cidade de Shibān é uma cidade habitada atualmente com a maioria dos edifícios construídos no Séc. XVI (Figura 2). A cidade é composta por edifícios com cerca de 5 a 11 andares, havendo inclusivamente um minarete que tem 38m de altura. Estes são construídos com paredes exteriores em adobe cuja espessura se estreita gradualmente nos andares superiores para aligeirar o seu peso e melhorar a estabilidade (Pacheco-Torgal et al., 2009).



Figura 2 - Cidade de Shibban, Iêmen (Webodysseum, 2012)

Estima-se que cerca de 30 a 50% da população mundial vive em habitações de terra (Kakizawa, 2007; Little et al., 2001; Pacheco-Torgal et al., 2009). Como seria expeável, a maioria da construção em terra encontra-se nos países em desenvolvimento (África, América central, Médio Oriente e algumas regiões Asiáticas), no entanto praticamente todas as nações mundiais têm alguma tradição de construção em terra. Existem países desenvolvidos como a França, a Alemanha, o Reino Unido, os EUA, o Brasil e a Austrália, entre outros, que há já algumas décadas têm vindo a encarar a construção em terra como uma alternativa bastante credível à construção corrente.

Os primeiros vestígios da utilização da terra na construção em Portugal surgem aproximadamente no ano 5000 a.C. No estuário do Tejo, recorrendo a argilas contendo mais ou menos elementos não plásticos (vegetação, por exemplo caules de folhas), foram descobertas ruínas de cabanas assumidas como habitações familiares. Existem também provas do uso de barro, aplicado nas paredes de silos onde as primeiras sociedades produtoras armazenavam cereais ou frutos secos, em Santiago do Cacém e em Reguengos de Monsaraz (Gomes, 2005)

As três técnicas de construção em terra (2.3) mais utilizadas no território Nacional são a taipa, o adobe e o tabique (Silva et al., 2013). Na Figura 3 apresenta-se exemplos da sua utilização e na Figura 4 esquematiza-se a distribuição geográfica da construção em terra a nível Nacional. A maioria da construção em terra nacional distribui-se pelo centro e sul do território (Figura 4), devido ao clima da região aliado ou à escassez de pedra ou ao custo elevado da pedra nesses locais (Font, 2005). A taipa é quase exclusiva do centro e sul do país devido ao domínio Islâmico entre os Séc. VII e XIII, na construção de fortes militares. A construção tradicional do Norte de Portugal envolvia tipicamente a pedra, utilizando-se o tabique apenas nas paredes divisórias das habitações (Silva et al., 2013). A predominância do adobe no litoral centro do país deve-se às características gerais dos materiais naturais existentes no local, juntando às terras argilosas, areias grossas, cal e a incorporação de fibras vegetais (Silveira et al., 2012). Silveira et al. (2012) afirmam que 40% do edificado existente no distrito de Aveiro, é construído em adobe. Para além destas três técnicas predominantes, há vestígios da utilização de terra escavada na construção de adegas, e ainda de terra moldada para pequenas dependências (Font, 2005).

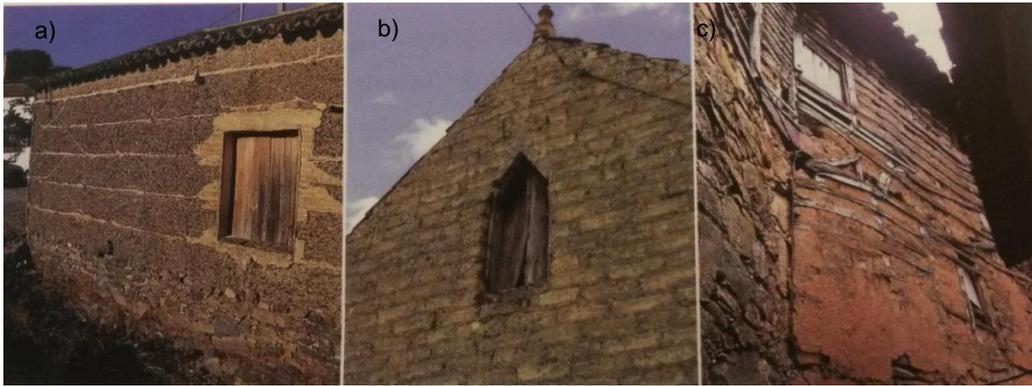


Figura 3 - Construção tradicional Portuguesa em terra: a) Taipa. b) Adobe. c) Tabique (Pacheco-Torgal et al., 2009)

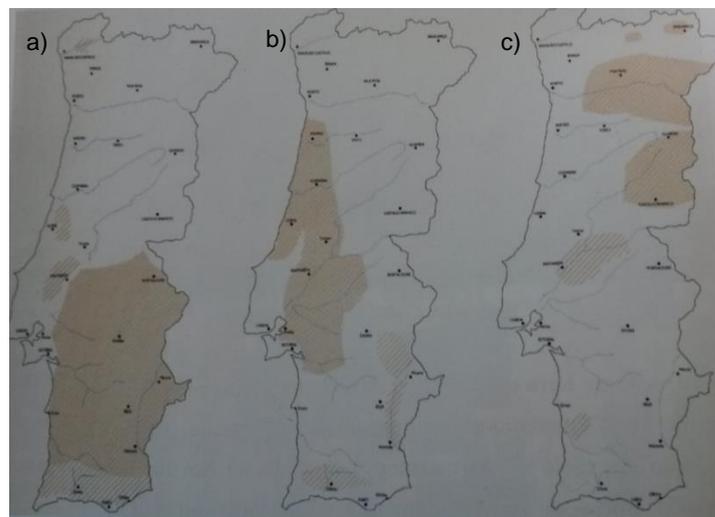


Figura 4 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra. a) Taipa. b) Adobe. c) Tabique (Pacheco-Torgal et al., 2009).

2.2. Propriedades e características da terra como material de construção

Na engenharia civil é comum abordar o material de construção “terra” como um solo, em que este é entendido como sendo *o conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação em água* (Motta, 1997). O solo é considerado um meio particulado, natural e trifásico (sólido, líquido e gasoso), conferindo-lhe a complexidade das suas características. A fase sólida do solo é constituída pelas partículas sólidas (minerais e orgânicas) e as fases líquida e gasosa por água (intersticial) e ar, respetivamente, ocupando os vazios entre as partículas sólidas.

O solo é constituído principalmente por matéria mineral e, até uma certa profundidade, alguma matéria orgânica (plantas e animais em decomposição, raízes, etc). Como matéria-prima na construção utiliza-se apenas a parte mineral do solo sendo que, na sua extração, deve-se escavar abaixo da profundidade da matéria orgânica (variável, mas geralmente até um metro de profundidade). Dado se escavar abaixo do solo arável (matéria orgânica), a utilização da terra como

material de construção não tem qualquer efeito devastado sobre os ecossistemas envolventes (Lourenço, 2002).

Como referido, o solo, na construção, é um material natural, em que as suas partículas sólidas provêm da desagregação das rochas mães por ação dos agentes atmosféricos. A deposição dessas partículas, que por vezes ocorre em zonas muito distintas da sua origem (ação dos agentes de transporte), forma então (para além de outros componentes já referidos) os solos, que escavados, serão usados na construção.

O processo de formação dos solos torna-os um material extremamente heterogéneo, variando a sua constituição tanto em profundidade como em extensão. Assim a heterogeneidade do solo torna o seu uso na construção bastante complexo e, por vezes, regido por regras pouco rígidas. Tanto é válido para a sua caracterização, seleção, preparação e utilização.

As propriedades fundamentais da terra, como material de construção são essencialmente; a coesão, a plasticidade, e a compressibilidade. Estas propriedades estão intrinsecamente ligadas ao comportamento da terra com a água e às características próprias da terra (Adam, 2001; Lourenço, 2002; Motta, 1997; Pacheco-Torgal et al., 2009; Rigassi, 1985). Por esta razão, será feita uma descrição das propriedades fundamentais da terra e do seu comportamento com a água.

2.2.1. Propriedades fundamentais da terra

A coesão resulta da força de atração entre as partículas do solo, sendo a propriedade essencialmente responsável pela sua resistência. A plasticidade de um solo traduz a sua capacidade de ser moldado sem variação de volume. Depende do tamanho e formato das partículas que compõem o solo e do seu teor de humidade. A coesão e a plasticidade são propriedades que estão diretamente ligadas à quantidade e natureza dos elementos finos de um solo, nomeadamente à fração argilosa e siltosa do solo.

A compressibilidade do solo está relacionada com a sua capacidade de variação de volume (diminuição) quando sujeito a pressão. Consiste no aumento da densidade do mesmo devido ao rearranjo das partículas sólidas, visto que estas são consideradas indeformáveis para as pressões exercidas na construção em terra. Depende da estrutura do solo, da natureza das partículas e do teor de humidade do solo. (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; K. M. a Hossain et al., 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998).

2.2.2. Características da terra

As características da terra mais importantes para a sua utilização como material de construção são; a granulometria e a estrutura, sendo que a primeira influencia a segunda e ambas são influenciadas pelo teor de água na terra.

Entende-se aqui por granulometria, a natureza e quantidade de cada elemento constituinte de um solo. Os elementos que constituem o solo (parte mineral) são; o seixo, a areia, o silte e a argila.

Os dois primeiros são considerados os elementos grossos (não inclui a areia de diâmetro inferior a 0,2 mm) e os últimos dois os elementos finos (incluindo a areia fina). Os elementos grossos são considerados estáveis, praticamente inertes (fisicamente e quimicamente), e têm um poder de retenção de água muito reduzido. O conceito de estabilidade mencionado, está associado às alterações das características do aglomerado de partículas na presença de diferentes teores de água, pelo que os elementos finos são considerados instáveis.

Resumidamente, tem-se a seguinte classificação:

- Seixo: 2 a 60 mm de diâmetro, inertes e sem qualquer poder de coesão.
- Areia: 0,06 a 2 mm de diâmetro. Inerte, em que a parte fina desta (inferior a 0,2 mm) já possui algum poder de coesão quando humedecida. Tem um elevado grau de fricção entre partículas o que resulta numa resistência interna elevada.
- Silte: 0,002 a 0,06 mm de diâmetro. Sem coesão quando secas mas em contacto com água apresentam uma boa coesão e, podem ainda, apresentar alterações de volume.
- Argila: diâmetro inferior a 0,002 mm. Pela elevada importância deste constituinte, serão apresentadas as suas características principais no ponto 2.2.3.

Note-se que a classificação granulométrica dos diferentes constituintes do solo varia de regulamentação para regulamentação, sendo que no presente trabalho se utilizou a classificação portuguesa, conforme a especificação LNEC E-293 (1970).

A estrutura de um solo depende, não só da sua granulometria, mas também da interação entre a água e o ar que rodeiam as partículas, condicionando a forma de agregação das mesmas. As relações entre a granulometria do solo e o teor de humidade criam estruturas particulares ou estruturas contínuas. As particulares apresentam fraca coesão e elevada estabilidade (ex. gravilha) enquanto as contínuas são muito instáveis, em que as partículas se encontram dispersos numa pasta de finos argilosos (ex. barro). Na estrutura do solo, os elementos grossos são responsáveis pela resistência mecânica, e os finos pela coesão e plasticidade.

2.2.3. Argila e suas propriedades

A argila é o elemento mais instável na constituição de um solo e a principal responsável pelas propriedades do mesmo. É composta por partículas coloidais com elevada plasticidade quando humedecidas. Quando seca, a argila toma a forma de torrões.

A argila é constituída principalmente por argilo-minerais, sendo os elementos mais frequentes; silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio. Estes elementos resultam da mistura de substâncias minerais provenientes da desagregação de rochas ígneas, depositadas no local da rocha mãe (argilas residuais) ou em regiões distantes (argilas sedimentares). A argila pode ser composta por vários argilo-minerais, podendo ainda haver diferenças acentuadas no mesmo local de

jazida (profundidade e extensão) (Gomes, 1988). As partículas de argila têm um formato alongado e lamelar, e encontram-se envolvidas por um filme de água (água de plasticidade), que é responsável pela coesão entre os coloides. As argilas podem se apresentar na forma de estruturas floculadas ou dispersas. A estrutura floculada caracteriza-se pelas partículas não tomarem qualquer orientação preferencial ficando estas mais próximas entre si. A estrutura dispersa caracteriza-se por um sentido de orientação uniforme das partículas (praticamente paralelas) geralmente na horizontal e mais afastadas entre si (Gomes, 1988; Pacheco-Torgal et al., 2009).

As propriedades mais importantes das argilas para a construção em terra são a granulometria, a plasticidade e a retração. A granulometria da argila confere às suas partículas uma elevada superfície específica e que, associada à capacidade de permuta de íons dos minerais argilosos, faz com que a argila tenha propriedades interessantes no que toca a estabilização de solos (ver ponto 2.6.3.). O conceito de plasticidade foi abordada em 2.2.1, não obstante, interessa reter que são as argilas as principais responsáveis por esta propriedade dos solos. A elevada superfície específica e a mineralogia das partículas de argila permite adsorver água (água de plasticidade). A água adsorvida funciona como lubrificante que facilita o deslizamento de umas partículas sobre as outras sempre que seja aplicada uma tensão superficial resultando na plasticidade da argila. A plasticidade da argila é assim afetada pela granulometria, mineralogia, estrutura dos minerais e pelo teor de humidade. A retração da argila permite o aumento de coesão na secagem mas pode também originar fissuração superficial, pelo que esta propriedade tem que ser controlada na construção. A retração da argila é proporcional ao seu teor de humidade e é influenciado pela sua composição mineralógica (Gomes, 1988).

2.2.4. Parâmetros de caracterização da terra

Com base nas propriedades fundamentais apresentadas, em seguida definem-se alguns parâmetros utilizados para a caracterização da terra:

- Limites de consistência: São também conhecidos como os limites de Atterberg e englobam o limite de liquidez (LL) o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). Estes limites permitem inferir o comportamento de um solo na presença da água. Dado que as frações finas do solo são as mais instáveis é sobre esses que se determina os limites apresentados, o que permite também inferir o comportamento de uma argila sem a determinação da sua composição mineralógica.
 - Limite de liquidez (LL): teor em água acima do qual um solo se comporta como um líquido.
 - Limite de plasticidade (LP): teor em água abaixo do qual um solo se comporta como um sólido (rocha muito branda e friável)
 - Índice de plasticidade (IP): gama de teores em água para a qual o solo exhibe um comportamento plástico e relaciona-se com a máxima variação de volume de um solo (retração).

Teor ótimo de água (TOA): Este teor relaciona a densidade do solo na presença de água quando o mesmo é compactado, pelo que tem também em conta a compressibilidade do solo. É utilizado para se determinar o teor em água que permite obter a densidade máxima seca de um solo.

Na compactação de um solo, para além da energia aplicada e da natureza do próprio solo, o teor em água tem uma influência significativa, que simplificada se traduz pela lubrificação das partículas e ocupação de vazios durante a compactação. Para cada tipo de solo é possível criar uma curva de compactação (ensaio Proctor) relacionando o seu teor em água com o peso volúmico seco, e nessa curva é possível identificar um ramo de compactação seca e um ramo de compactação húmida. De forma resumida, basicamente um solo com pouca água apresenta-se aglomerado em torrões que irão ser desfeitos na compactação com a consequente expulsão de ar e rearranjo das partículas. À medida que se aumenta o teor em água a ação de compactação é facilitada pela desagregação dos torrões e lubrificação das partículas. Assim sendo, o aumento do teor de água conduz ao aumento da densidade seca. Porém, se a quantidade de água ultrapassar determinado valor (teor ótimo de água), verifica-se que esta não permite a expulsão de ar do solo ficando aprisionado nos vazios. A partir deste ponto o aumento de água não permite que a compactação se realize de forma tão eficaz pelo que, no ramo húmido, o aumento do teor de água conduz à diminuição da densidade seca. É a incompressibilidade da água que impede um acréscimo de compactação (Rigassi, 1985; Santos, 2008).

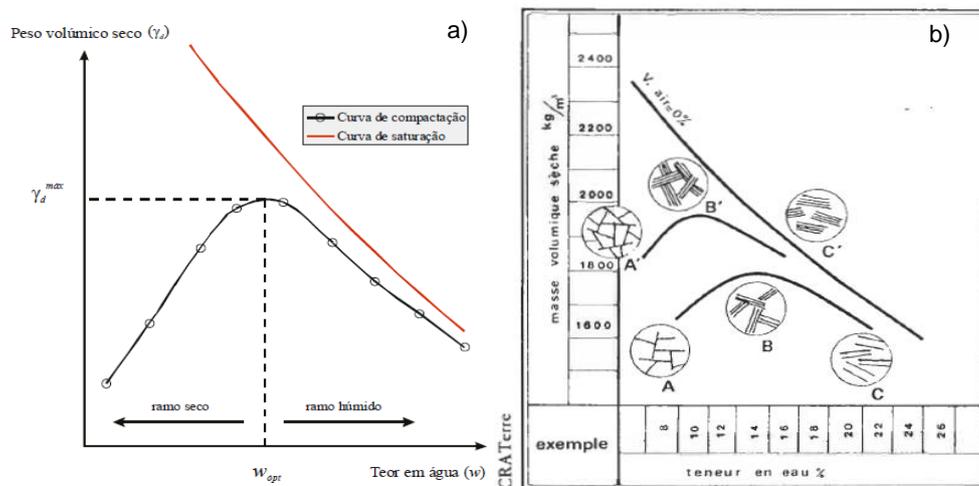


Figura 5 – Curvas de compactação: a) Curva de compactação de um solo (Compactação Elementos Teóricos, 2008). b) Curva de compactação de uma argila (CRATerre et al., 1979)

Tratando-se de argilas, por análise da Figura 5 tem-se que o ramo seco da compactação corresponde ao estado floculado e o ramo húmido ao estado disperso. No ramo seco encontram-se as estruturas floculadas (A e A'), associadas a menores quantidades de água, mas maior compressibilidade, até certo ponto. No ramo húmido encontram-se as estruturas dispersas (C e C') que, por si só, já têm um menor volume de vazios e os que têm estão maioritariamente preenchidos por água. Devido à orientação quase paralela das partículas no estado disperso, a água tem ainda maior dificuldade em ser expulsa durante a compactação. Na Figura 5 é também demonstrado que

um solo compactado com TOA não conduz necessariamente à máxima densidade seca absoluta, pois como referido, depende também da energia de compactação aplicada. (curva A'C' tem maior energia de compactação que curva AC).

Segundo a CRATerre (Lourenço, 2002), o teor de água durante a compactação tem influência no comportamento mecânico do solo, em especial nos solos finos, influenciando a permeabilidade, a absorção de água, a expansão do solo e ainda a resistência mecânica inicial de um solo compactado. A permeabilidade é elevada no ramo seco da compactação e mínima para o TOA. A absorção de água é tão mais significativa quanto menos compacto o material, tendo ainda mais importância se este se encontrar no estado floculado. A expansão do solo é proporcional à absorção, assim sendo, é menos significativo no estado disperso. A correlação entre a absorção de água e a expansão com a compactação do solo permite dizer que um material destinado a trabalhar em locais secos deverá ser compactado preferencialmente no ramo seco e um material aplicado em ambientes húmidos com um teor de água acima do ótimo. A resistência mecânica inicial, logo após desmoldagem (como no caso dos BTC) é máxima para a compactação no ramo seco. Este último fator é importante na medida em que condiciona a rapidez de progressão das atividades subseqüentes à desmoldagem (maior importância em processos como taipa e BTC) (CRATerre et al., 1979; Rigassi, 1985).

2.2.5. Propriedades higrotérmicas

Não se tendo considerado esta propriedade como uma propriedade fundamental da terra, merece ser destacado devido ao seu papel no impacto positivo que a construção em terra tem sobre a saúde dos ocupantes e às suas vantagens ambientais. As propriedades higrotérmicas da terra referem-se à capacidade de troca de humidade e temperatura com a atmosfera envolvente.

Devido à capacidade de absorção de água e da permeabilidade de vapor de água do solo, os elementos construídos em terra permitem autorregular os níveis de humidade interiores dos edifícios. Ou seja, a terra é um material higroscópico, com uma humidade de equilíbrio determinada por uma dada humidade relativa ambiente. As trocas de humidade efetuam-se ao nível dos poros da terra, sendo que a mesma consegue manter a humidade relativa interior entre os 40 a 60%. Esta capacidade depende de vários outros fatores como a humidade inicial, a temperatura e a taxa de renovação do ar (McGregor et al., 2014; Pacheco-Torgal et al., 2009).

A terra tem uma condutibilidade térmica baixa (e acústico também), pelo que apresenta boas condições de isolamento térmico como material de construção. As paredes em terra crua caracterizam-se por serem elementos de elevada espessura pelo que o seu aclamado isolamento térmico (e acústico) está mais associado à inercia térmica da parede do que à sua baixa condutibilidade térmica (Adam et al., 1995).

2.2.6. Potencialidades e limitações da terra como material de construção

As potencialidades e limitações da terra como material de construção são válidas para todas as técnicas de construção em terra pelo que se aplica também aos BTC.

Potencialidades (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Pacheco-Torgal et al., 2012):

- Matéria-prima abundante e de custo reduzido. Facilidade de acesso para populações carenciadas;
- A sua extração não danifica os ecossistemas envolventes (não se utilizam solos aráveis);
- Facilidade de utilização. Em geral, a sua utilização não exige equipamentos especiais;
- Permite conservar a tradição de construção antiga;
- Permite a criação de oportunidades de trabalho à população local e a utilização de materiais locais;
- Baixo custo de produção e de construção;
- Enormes possibilidades arquitetónicas com o seu carácter estético particular;
- Elevada resistência ao fogo (praticamente incombustíveis);
- Material não poluente, não prejudicando a qualidade do ar no interior das construções;
- Autorregula o teor de humidade no interior das construções;
- Bom isolamento térmico e acústico das construções;
- Baixo consumo energético e libertação de dióxido de carbono desde a sua extração até à construção;
- Facilidade de reciclagem. No caso de elementos não estabilizados, todo o material é reciclável, bastando ser desagregado. Reduzidos desperdícios de construção;

Limitações (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Pacheco-Torgal et al., 2012):

- Baixa resistência à acção sísmica, devido à baixa resistência à tração e flexão e à reduzida ductilidade destes materiais;
- Sensível à acção da água se não estabilizado (ou devidamente protegido);
- Durabilidade reduzida, em casos de falta de manutenção adequada;
- A retração da argila, quando não controlada, poderá resultar no aparecimento de fendas superficiais;
- Baixa aceitação social, considerado por muitos como um material de construção de qualidade inferior;
- Falta de documentos normativos que asseguram a regulamentação da construção em terra.

2.3. Estabilização do solo

Visto que o solo é um material natural complexo, nem sempre apresenta as características desejadas para o seu uso na construção. Assim, recorre-se à estabilização do solo como forma de melhorar as suas propriedades. A definição de estabilização do solo é portanto, “qualquer processo

que melhora as propriedades de um solo permitindo desempenhar a sua função na engenharia” (Rix, 1998).

A estabilização do solo atua sobre as três fases do solo aumentando o seu desempenho físico, mecânico e de durabilidade. Em geral, melhora as propriedades do solo através de três formas: reduzindo o volume de vazio; preenchendo vazios que não se conseguem reduzir mais; melhorando a coesão entre as partículas do solo (Adam, 2001; Kerali, 2001; Rigassi, 1985; Rix, 1998). Assim, promovem nos solos a diminuição da porosidade, a redução da permeabilidade e o aumento da resistência mecânica. Desse modo, deverá ocorrer uma redução na sensibilidade à água e erosão superficial, minimização da fissuração e aumento da coesão.

Existem três modos de estabilização do solo, envolvendo métodos físicos, mecânicos e químicos. No entanto, a estabilização não se trata de uma ciência exata, não existindo um método de estabilização que responda a todos os problemas, sendo que os mesmos dependem dos seguintes fatores:

- As exigências funcionais da obra, tais como: tempos de cura; condições atmosféricas durante a cura e ao longo da vida útil da construção: durabilidade pretendida (objetivo da estabilização);
- A natureza e composição do solo, especialmente a proporção e as características da sua fração argilosa;
- A natureza e proporção de estabilizador a incorporar;
- Fatores sociais e económicos.

2.3.1. Estabilização física

A estabilização física consiste na introdução (ou remoção) de um ou mais materiais que alterem a constituição do solo.

As formas mais comuns de estabilização física dos BTC passam pela adição de fibras ou a adição (ou remoção) de um determinado agregado (argiloso/arenoso ou pedra/seixo respetivamente). No caso da adição de fibras procura-se aumentar a coesão entre as partículas do solo conferindo assim uma resistência mecânica superior ao solo. As fibras têm muito maior expressão nos blocos de adobe do que nos BTC, por diminuírem substancialmente a fendilhação superficial na secagem dos mesmos, redistribuindo as tensões de retração da argila por toda a massa. A incorporação (ou remoção) de um determinado agregado tem como objetivo melhorar a composição granulométrica do solo, de modo a que este se encontre dentro dos limites definidos para a produção de BTC.

A adição de fibras é algo que é feito desde o início da utilização da terra como material de construção, existindo referências da incorporação de palha em blocos argilosos, denominados blocos de “thobe”, no Norte de África e em blocos de “adobe” na América Central (K. M. a Hossain et al., 2011). Algumas das fibras utilizadas em BTC são: a palha seca, sisal, pelos de animais (vacas, cavalos, etc), bambu, fibras de palmeiras, fibras de aço (Osula, 1996), entre outros. Nos BTC recorre-

se a esta técnica, geralmente como forma de aumentar a resistência à tração dos blocos (Medjo Eko et al., 2012; Namango, 2006; Riza et al., 2010; Taallah et al., 2014; Walker, 1995).

O aumento da compacidade por adição de agregados finos provém do seu efeito “filler” na granulometria do solo, ocupando vazios que as partículas do solo por si só não conseguem. De modo a reduzir o impacto ambiental, alguns dos agregados finos utilizados são resíduos de diferentes sectores industriais, como por exemplo: escórias de alto-forno; cinzas volantes; cinzas pozolânicas; resíduos da produção do cimento; pó da casca de arroz; pó da cana-de-açúcar; pó de cassava. Outros materiais finos utilizados são os minerais argilosos como a caulinite e ainda a microsílca. A remoção de agregados grossos é uma fase intrínseca à produção dos BTC (peneiração) pelo que esta etapa não é referida nos textos consultados sobre os mesmos.

2.3.2. Estabilização mecânica

Este método de estabilização é o único que não envolve a adição de um outro material estranho ao solo (pode ser necessário a adição de água). Consiste na aplicação de energia mecânica ao solo, sobre a forma de compactação, reduzindo o seu volume de vazios e aumentando a sua compacidade.

As duas consequências mais significativas da compactação do solo nos BTC são: aumento do número de pontos de contacto entre as partículas do solo, resultando na diminuição da deformabilidade e no aumento da resistência do bloco; redução do volume de vazios que, por sua vez, diminui a permeabilidade e porosidade do bloco. Assim existe um aumento da resistência mecânica e da durabilidade do bloco, com destaque para a resistência à ação da água (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; K. M. a Hossain et al., 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998).

Sendo a ação de compactação ocorrência inerente à produção dos BTC, considera-se que estes são estabilizados apenas quando envolvem métodos químicos.

2.3.3. Estabilização química

A estabilização química de um solo resulta da introdução do solo de substâncias como forma de alterar as suas propriedades físico-químicas com a criação de novos compostos e aumentando a coesão entre partículas (Kerali, 2001; Motta, 1997; Rix, 1998).

Este método de estabilização é o que mais contribui para os ganhos de resistência e durabilidade dos BTC, pois, ao contrário dos restantes métodos de estabilização, não é (significativamente) alterado na presença de água (Kerali, 2001; Motta, 1997; Rix, 1998). Os estabilizadores químicos mais utilizados são: o cimento, a cal, o betume e as pozolanas. Neste trabalho optou-se pela incorporação de cimento e cal nos blocos, pelo que apenas se estudou os mecanismos de estabilização associados a estes materiais.

2.3.3.1. Estabilização com cimento

O cimento é o estabilizador mais utilizado no mundo, devido às suas características mecânicas e de durabilidade e razoável compatibilidade com uma maior gama de solos (Kerali, 2001; Motta, 1997; Pacheco-Torgal et al., 2009; Rix, 1998). Existe também o fator social associado, paradoxalmente, com as regiões subdesenvolvidas (África e a América Central), em que a utilização de cimento demonstra estatuto na sociedade, algo que é muito procurado pelos povos destas regiões. De facto, a utilização de cimento está associada a construções mais sólidas e mais nobres.

A estabilização do solo com cimento provém da hidratação do cimento na presença de água. A reação de hidratação do cimento cria um gel insolúvel, com capacidades de dispersão pelos poros e de ligação das partículas do solo. O gel cimentício interage principalmente com as frações de areia e seixo do solo, criando-se uma argamassa solo-cimento. Acredita-se, que esta é a fonte de maior resistência da estabilização do solo com cimento. O gel criado é composto maioritariamente pelos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, sendo que na sua formação se liberta cal (cal livre), sob a forma de cristais de hidróxido de cálcio. A cal livre poderá, por sua vez, reagir com a fração argilosa do solo (reações pozolânicas), criando ligações adicionais ao gel cimentício, reforçando assim a matriz solo-cimento (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998). A reação da cal livre será descrita no ponto 2.6.3.2 em maior pormenor.

O cimento como estabilizador nos BTC tem como função torná-los mais resistentes (pico da resistência atingida aos 28 dias após hidratação) e aumentar a sua resistência à água (gel cimentício é insolúvel), pela redução da contração e da expansão dos minerais argilosos. A elevada resistência mecânica do cimento, especialmente a sua resistência inicial (sete dias) e a sua durabilidade frente a ação da água, são as principais propriedades que o tornam vantajoso para a estabilização do solo. Apesar de se adequar à maioria dos solos, é ideal para a estabilização de solos mais arenosos que argilosos (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998).

2.3.3.2. Estabilização com cal

O uso da cal como estabilizador de solos não é novidade, sendo que desde os tempos do Antigo Egito e dos Impérios Grego e Romano, foi usado como aditivo nas argamassas de assentamento de alvenarias e cantarias (pirâmides, monumentos, etc.), e como estabilizador das primeiras estradas em terra (K. M. a Hossain et al., 2011; Riza, et al., 2011).

O processo de estabilização do solo com cal, nomeadamente a cal aérea, faz-se, basicamente, por duas reações complexas (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Osula, 1996; Rix, 1998; Riza, et al., 2011); reação de modificação, com início instantâneo em contacto com água (solo húmido); reação de carbonatação que se prolonga no tempo. A reação de modificação altera rapidamente a plasticidade do solo e conseqüentemente a sua trabalhabilidade. A reação pozolânica que ocorre entre a cal e os minerais argilosos, produz vários compostos cimentícios insolúveis, que resulta num aumento de resistência (aumento da coesão) e de durabilidade do solo. Em suma, estas reações provocam a aglutinação das partículas e a modificação das suas características, com maior

expressividade na fração argilosa do solo especialmente se esta for muito plástica e expansiva (Pacheco-Torgal et al., 2009).

A reação de modificação faz-se por permuta iónica e floculação. Ao entrar em contacto com a água a cal dissocia-se e os seus iões de cálcio permutam com os iões metálicos presentes nas superfícies dos minerais argilosos (magnésio, sódio, potássio). As permutas iónicas, alteram as cargas eletrónicas das superfícies dos minerais argilosos, o que resulta no aumento da atração entre partículas argilosas, isto é, a floculação das partículas (a ligação entre partículas argilosas é dependente do tamanho e da carga elétrica dos seus iões). A floculação das partículas resulta, conseqüentemente, na aglomeração das partículas da mistura de solo-cal. (Rix, 1998)

A reação de cimentação é uma reação lenta que depende da quantidade e composição mineralógica da argila (presença de pozolanas), ocorrendo apenas na presença de humidade e calor. (Kerali, 2001; Pacheco-Torgal et al., 2009; Rix, 1998) A reação de cimentação, é semelhante às reações já enunciadas para a estabilização do solo com cimento na medida em que o resultado é um gel insolúvel (composto por silicatos e aluminatos de cálcio hidratados). Esta reação é a mais importante, conferindo o aumento da resistência e da durabilidade ao solo. Assim, por ser uma reação prolongada no tempo, esta reação é a principal responsável pelos ganhos de resistência e de durabilidade a longo prazo. A diferença entre as reações de cimentação do solo-cimento e do solo-cal provém do fato da hidratação do cimento se realizar independentemente do tipo de solo, e com a cal é necessário a existência de minerais pozolânicos suficientes, visto esta reação só ocorrer depois da reação de modificação.

2.4. Técnicas de construção em terra

A construção em terra é a técnica construtiva mais antiga do mundo pelo que existem inúmeras técnicas diferentes que têm sofrido uma evolução temporal. Como a construção em terra utiliza recursos locais existe uma grande variabilidade geográfica, havendo diferenças nos processos de construção dentro das mesmas técnicas. No entanto, a CRATerre distingue 18 técnicas de construção em terra, classificadas por sistema de construção em três grupos distintos; monolítica, em alvenaria e como enchimento e revestimento.

Na Tabela 1 apresentam as técnicas de construção em terra segundo a classificação da CRATerre. Das 18 técnicas apresentadas na Tabela 1 apenas serão aprofundadas 4 técnicas: O adobe e a taipa (referida como terra compactada na Tabela 1) por serem as técnicas mais relevantes em Portugal (2.1.); os blocos de terra compactada, pois são o objeto de estudo do presente trabalho; e ainda a técnica da terra ensacada, pois é a técnica de construção em terra crua mais recente e menos investigada até ao momento. Note-se que a terra ensacada não consta na lista de técnicas de construção em terra da CRATerre, provavelmente devido ao pouco conhecimento que se tem sobre esta técnica.

Tabela 1 - Técnicas de construção em terra segundo a CRATerre.

Sistema de construção		
Monolítica	Alvenaria (Unidades)	Enchimento e revestimento
Terra escavada	Blocos batidos	Terra de recobrimento
Terra vazada	Blocos talhados	Terra sobre engradado
Terra empilhada	Blocos compactados (BTC)	Terra-palha
Terra modelada	Torrões de terra	Terra de enchimento
Terra compactada (taipa)	Terra extrudida	Terra de cobertura
	Adobe moldado	
	Adobe manual	
	Adobe mecânico	
	Terra ensacada	

2.4.1. Adobe

O adobe é um bloco de terra crua moldado e seco ao sol. A construção em adobe é das técnicas de construção em terra mais utilizadas no mundo, com maior incidência nos países em desenvolvimento devido à sua simplicidade de fabrico e aplicação e ao reduzido custo associado à mesma.

O processo mais comum de fabrico do adobe consiste essencialmente nas seguintes fases: extração e preparação da terra de modo a ter as características necessárias; Amassadura da mistura (terra com água e outros) até apresentar a plasticidade adequada; Moldagem dos blocos em moldes de madeira sem fundo ou topo, em que a mistura plástica é apenas despejada nos moldes ou então atirada de modo a conseguir uma maior compactação; após o preenchimento do molde é alisada a superfície dos blocos, à mão ou com o auxílio de uma régua de madeira ou duma colher de pedreiro; Desmoldagem do bloco ainda com a mistura no estado plástico (Figura 6); Colocação dos blocos a curar ao sol no local de produção (sem envolver o seu transporte).



Figura 6 - Desmoldagem de blocos de adobe (Picorelli, 2011).

Inicialmente os adobe eram moldados à mão, passando depois a serem moldados artesanalmente em moldes de madeira o que possibilitou a moldagem de vários blocos em simultâneo. Em alguns países utilizam-se moldes longos e contínuos criando-se uma peça contínua

que é posteriormente cortada em blocos mais pequenos. Atualmente existem processos semi-industriais de produção, através da utilização de equipamentos mecânicos que produzem adobes em série por alimentação da pasta plástica argilosa. Uma das vantagens dos adobes provém da diversidade de moldes utilizados, permitindo a obtenção de adobes de variadas dimensões (Lourenço, 2002; Pacheco-Torgal et al., 2009).

A terra utilizada para os adobes deve ser essencialmente argilosa, possuindo alguma areia, visto que esta se deve apresentar suficientemente plástica de modo a permitir a sua moldagem. Geralmente utiliza-se a terra no local de construção pelo que deve haver fácil acesso a água (Pacheco-Torgal et al., 2009). Hoje em dia, em países desenvolvidos recorre-se, por vezes, à estabilização dos adobes com cal aérea. Visto que a terra utilizada é argilosa, uma prática comum é a introdução de fibras vegetais curtas na amassadura, de modo a minimizar a fendilhação superficial do bloco aquando da retração da argila por secagem ao sol. É também possível recorrer-se à utilização de materiais como pano de sisal ou filme de plástico, para cobrir os blocos de modo a proporcionar uma secagem mais gradual dos mesmos.

O processo de construção das alvenarias de adobe é simples na medida em que os blocos são colocados do mesmo modo que a alvenaria tradicional, utilizando uma argamassa de terra (geralmente a mesma utilizada para o fabrico), que garante uma melhor compatibilidade com os blocos. As paredes de adobe não necessitam de acabamento exterior, mas no caso de se proceder ao seu revestimento, deve ser utilizado um reboco à base de terra conforme referido para a argamassa de assentamento dos blocos. Para além da construção de paredes, os adobes permitem a construção de arcos, abóbadas e cúpulas.



Figura 7 - a) Paredes de adobe em construção. b) Produção mecânica de Adobe (Rael, 2009).

2.4.2. Taipa

A taipa consiste na construção de paredes monolíticas de elevada espessura por compactação da terra em cofragens, de forma semelhante ao realizado no betão armado. Quando aplicada de forma adequada, é das técnicas de construção em terra com maior durabilidade e resistência, havendo inúmeras construções antigas que ainda se encontram funcionais, como por exemplo a grande muralha da China (extensas secções em taipa, Figura 1). Em Portugal, até aos

anos 50, a taipa era a técnica construtiva mais utilizada no centro e sul do país (Pacheco-Torgal et al., 2009).



Figura 8 – Exemplos de construção em taipa: a) Novo edifício da empresa Ricola, Suíça (2012). (Rael, 2009). b) Parede de taipa em construção. c) Piscina coberta com paredes exteriores em taipa à vista, Espanha (2007) (Empresa Betão e Taipa, Lda).

O processo construtivo tradicional da taipa envolvia os seguintes passos: extração e preparação da terra; execução de caboucos e embasamentos (fundações, geralmente em alvenaria de pedra); montagem da cofragem, designado por taipais ou enchaméis; preenchimento dos taipais e compactação da terra por camadas; remoção do taipal assim que a taipa se encontra seca o suficiente; montagem do taipal no troço subsequente ao painel construído, ficando o painel exposto ao sol de modo a endurecer lentamente; repetição do processo até se ter uma fiada completa; início de outra fiada por cima com o cuidado de se manter as juntas verticais desfazadas; repetição do processo até se obter as dimensões da parede desejadas (Eusébio, 2001). As paredes em taipa não necessitam de acabamento, mas no caso em que se considere necessário este deve ser compatível com o material utilizado na construção da parede.

Os taipais tradicionais eram compostos por dois elementos laterais e dois frontais (comportas) e quatro costeiros unidos por agulhas e canguetas (de madeira ou corda) como sistema de travamento lateral. Cria-se assim uma caixa sem topo e sem fundo conforme a Figura 9. Atualmente, como acontece com o betão armado, os sistemas de cofragens já permitem a utilização de vários materiais dependendo do acabamento pretendido (madeira, contraplacado, metálico, entre outros). Podem ainda ser utilizados sistemas hidráulicos deslizantes (Eusébio, 2001). Tradicionalmente, a compactação era feita manualmente com a utilização de pilões ou maços em madeira. Estes foram posteriormente substituídos por pilões metálicos e mais recentemente por compactadores pneumáticos. Estes últimos são os maiores responsáveis pelos ganhos em produtividade na construção atual em taipa. Para além da escolha adequada da terra, a força de compactação é determinante na qualidade final da taipa (Lourenço, 2002).

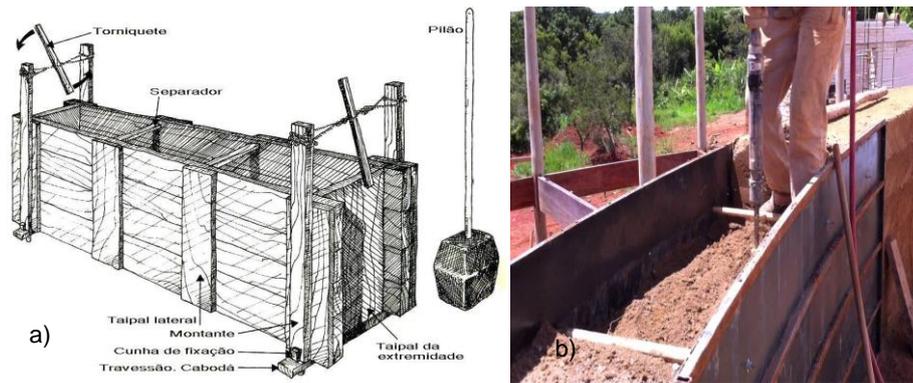


Figura 9 – a) Taipal e pilão tradicionais (Eusébio, 2001). b) Construção em taipa moderna.

A terra utilizada para a taipa deve ter uma granulometria extensa, sendo maioritariamente arenosa, possuindo alguns seixos e pedras e pequenos teores de argila (Lourenço, 2002; Pacheco-Torgal et al., 2009). A utilização de terra de granulometria mais grosseira permite atingir maiores níveis de compactação após compactação. A redução do teor de argila evita a geração de fissuras superficiais garantindo-se ao mesmo tempo alguma coesão à terra. É prática comum estabilizar a terra utilizada para a taipa com ligantes, como o cimento ou a cal, de modo a melhorar o desempenho da taipa. A terra colocada nas cofragens está apenas ligeiramente humedecida de modo a que facilite a compactação da mesma, fazendo com que esta técnica possa ser utilizada em locais sem acesso abundante de água. Nas juntas horizontais entre painéis de taipa é possível encontrar alguns materiais de reforço como o tijolo cerâmico maciço, pedra ou argamassas (Pacheco-Torgal et al., 2009). As paredes de taipa podem também ser reforçadas com varões de aço, como acontece com o betão armado.

2.4.3. Terra ensacada

A técnica da terra ensacada, como o nome indica, utiliza sacos ou tubos preenchidos com terra, que são empilhados para a construção de paredes, cúpulas e abóbadas. É uma espécie de taipa flexível (Wojciechowska, 2001). A terra ensacada é uma das técnicas construtivas em terra mais recentes, sendo inicialmente aplicado pelos exércitos em tempos de guerra como forma de construção rápida de *bunkers* (abrigo à prova de balas) ou como barreiras protetoras de cheias (temporárias).



Figura 10 - Exemplos de cúpulas em terra ensacada (Geiger et al., 2014).

Uma vez extraída e preparada a terra e executadas as fundações (embasamento por gravilha ou gravilha ensacada) inicia-se a construção das paredes de terra ensacada: colocação de uma fiada de sacos ou tubos com os cantos sobrepostos de modo a não deixar vazios nas juntas; compactação e nivelamento da primeira fiada de sacos ou tubos; aplicação de duas filas de arame farpado sobre a primeira fiada; criação da segunda fiada de sacos ou tubos repetindo-se sempre este processo até à altura desejada. O arame farpado serve como elemento de união entre as fiadas evitando que os sacos escorreguem uns sobre os outros aumentando assim o seu confinamento lateral (Geiger et al., 2010, 2014).

Os sacos utilizados são geralmente de polipropileno mas podem também ser de sisal ou juta, tendo o problema dos últimos se decomporem com o tempo. Os tubos são sacos comprimidos, geralmente em forma de rolo que depois são cortados à medida necessária. Os sacos ou tubos servem de alguma forma como cofragens para a terra visto que esta é colocada no seu interior e depois compactada (Wojciechowska, 2001). A compactação é feita manualmente com a utilização de pilões, muito à semelhança da taipa. A força aplicada e o material ensacado são essenciais na garantia de qualidade da construção. A compactação serve não só para o adensamento da parede mas também como forma de colmatar as juntas horizontais entre sacos garantindo a estanqueidade da estrutura (Geiger et al., 2010, 2014).

A terra utilizada nesta técnica é bastante variada, procurando-se que seja arenosa com pouca argila, devendo também ser aceitável para a construção em taipa (Wojciechowska, 2001). É possível estabilizar a terra com ligantes como a cal ou o cimento. Pode ainda ser reforçado com agregados leves de modo a aumentar o isolamento térmico (argila expandida, vermiculita, permiculita, entre outros). As construções em terra ensacada devem ser rebocadas com um reboco à base de terra de modo a proteger os sacos ou tubos da exposição das radiações ultravioletas. O reboco permite também um acabamento com maior aceitação estética, evitando que a construção pareça militar. Esta técnica de construção tem uma grande vantagem, permitindo que seja utilizada em zonas húmidas e locais onde a ocorrência de cheias é frequente, visto que os sacos evitam a desagregação da construção (Geiger et al., 2014).



Figura 11 – a) Compactação de uma fiada de uma parede. b) e c) Exemplo de construção de edifícios com paredes verticais em terra ensacada (Geiger et al., 2014).

2.5. Blocos de terra compactada (BTC)

De acordo com a CRATerre os blocos de terra compactada podem ser definidos como sendo: *pequenos elementos de alvenaria com características regulares e verificadas, obtidos pela compactação estática ou dinâmica de terra num estado húmido, desmoldados imediatamente a seguir* (CDI and CRATerre-EAG/ODA, 1998). Portanto, devido à compactação, os BTC podem ser considerados a evolução tecnológica dos blocos de adobe. Assim, a coesão do bloco de BTC não depende apenas da quantidade de argila presente na terra, como no caso do adobe, mas também da pressão de compactação exercida na sua produção.

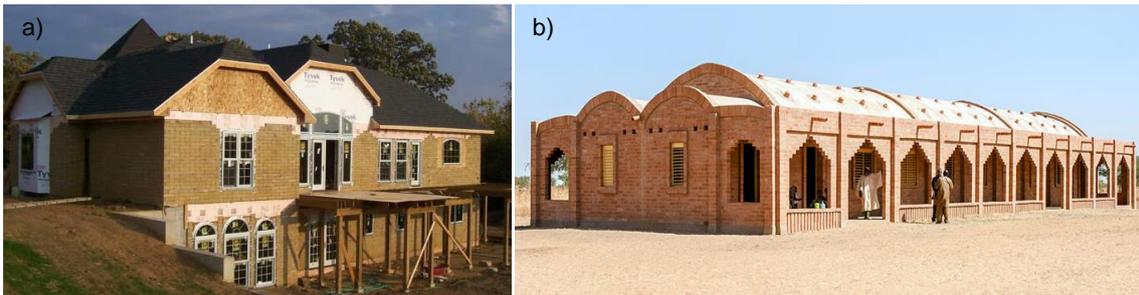


Figura 12 - Exemplos de construções em BTC: a) Casa familiar, EUA 2005. b) Escola primária, Filipinas 2013

2.5.1. Contexto histórico

A compactação de terra tem origens primordiais, utilizada na taipa e outras antigas técnicas construtivas em terra, pelo que a origem do bloco de terra compactada ocorre com a invenção do primeiro equipamento mecânico capaz de compactar a terra. A primeira prensa de BTC foi a famosa Cinvaram, inventada pelo engenheiro Raul Ramires em Bogotá, Colômbia, no ano 1952 (Rigassi, 1985). Tendo em conta a história da construção em terra, esta é uma invenção recente e deve-se ao facto da construção em terra ter perdido expressividade com a revolução industrial do Século XVIII. Só após a Segunda Grande Guerra é que se voltou a dinamizar a construção em terra, originando a invenção da Cinvaram (Exelbirt, 2011). Nos anos 70 e 80 surgiram novas prensas manuais e mecânicas criando um mercado genuíno de produção e aplicação de BTC (Rigassi, 1985). Assim, pode-se considerar então que o BTC é uma técnica moderna e que será a mesma a dinamizar a construção em terra no futuro.



Figura 13 – a) Prensa Cinvaram (Barbosa, 1996). b) Prensa testaram.

Em Portugal esta técnica foi pouco difundida visto que a sua invenção nos anos 50, na Colômbia, coincidiu com o abandono das técnicas de construção em terra em Portugal (Lourenço, 2002). No entanto, na Escola Profissional de Serpa, ocorreu um curso profissional em que a construção com BTC era incorporada. Contudo o curso deixou de existir no ano 2002.

2.5.2. Características dos BTC

De forma resumida a terra utilizada nos BTC é argilosa e arenosa, estando associada a granulometria extensa. É prática comum recorrer-se à estabilização da terra com diferentes produtos, sendo os mais comuns o cimento e a cal. A mistura de terra que será moldada na prensa deve-se encontrar com um teor de água próxima do ótimo.

A tecnologia dos BTC, nomeadamente a prensa utilizada, permite a produção de diferentes tipos de blocos. Podem ser blocos maciços, perfurados ou blocos de encaixe (tanto macho fêmea como topo a topo). As dimensões dos BTC dependem dos moldes da prensa utilizada, sendo que algumas prensas permitem a produção de vários blocos (mais pequenos) em simultâneo. As dimensões produzidas variam muito de país para país contudo as mais correntes são: 250 x 140 x 90 a 300 x 150 x 120 mm.

Os BTC podem ter funções estruturais, capacidade autoportante, ou ser utilizados como material de enchimento. Têm um acabamento liso devido à moldagem o que lhes permite serem aplicados em obra sem necessidade de revestimento, traduzindo-se numa vantagem económica e ambiental. Devido à compactação da terra durante a moldagem, os blocos frescos (logo após moldagem) apresentam resistência suficiente para serem transportados e empilhados para a fase de cura. O transporte só pode ser feito numa distância curta e deve ser feita com cuidado pois as arestas dos blocos frescos são facilmente danificadas. Esta característica permite uma ocupação mais eficaz do espaço de armazenamento dos blocos em relação aos blocos de adobe.

Para as sociedades que empreguem as técnicas de construção com blocos de betão ou alvenaria de tijolo, a utilização dos BTC torna-se mais atrativa que as restantes técnicas de construção em terra, devido à estabilidade dimensional dos blocos. É a pressão de compactação exercida na moldagem dos blocos que torna as dimensões dos blocos mais estáveis. A tecnologia dos BTC permite a standardização dos blocos e um melhor controlo de qualidade do processo de produção, indispensáveis na construção atual. Obtêm-se assim as vantagens da standardização dos produtos modernos a custo de materiais produzidos localmente (Lourenço, 2002).

2.5.3. Produção de BTC

Em geral, o processo de produção dos BTC é comum para qualquer tipo de BTC. É um processo cíclico cujo rendimento é geralmente limitado pelo grau de mecanização do estaleiro de produção. De modo a garantir um rendimento eficaz é essencial haver uma gestão correta da produção e um controlo de qualidade em cada etapa. O processo de produção envolve, geralmente as seguintes 11 etapas:

1. **Extração:** escavação da terra abaixo de um metro de profundidade de modo a conter o mínimo possível de matéria orgânica;
2. **Secagem:** espalhamento da terra em camadas finas;
3. **Pulverização:** tornar a terra num pó fino sem torrões (Figura 14);
4. **Peneiração:** retirar elementos indesejados na mistura (partículas maiores e matéria orgânica) (Figura 14);
5. **Dosagem dos constituintes:** controlar por peso ou volume os diferentes constituintes de cada amassadura;
6. **Mistura a seco:** criar uma mistura seca homogénea;
7. **Mistura húmida:** adicionar a água necessária à amassadura e misturar até ficar homogéneo;
8. **Dosagem da mistura:** medir por peso ou volume da mistura húmida a colocar na prensa de modo a obter a densidade pretendida;
9. **Moldagem:** compactar a mistura na prensa;
10. **Desmoldagem:** remover o bloco da prensa e transporta-lo para o local designado;
11. **Cura:** varia com a incorporação ou não de estabilizadores e as suas características.



Figura 14 – Equipamento e material utilizado na produção: a) Pulverizador mecânico de pás. b) Peneiro com 4mm de abertura. c) Terra após pulverização e peneiração.

A **pulverização** da terra é uma etapa fundamental, devendo esta resultar num pó fino de modo a permitir uma dosagem e mistura correta com o estabilizador. A existência de torrões de argila prejudica a homogeneidade dos blocos e a sua coesão. Pode ser feita manualmente (maços e pilões) tornando-se um trabalho árduo e demoroso ou pode-se recorrer a pulverizadores mecânicos (Figura 14). Segundo Adam, (2001), a pulverização manual tem um rendimento médio de 1m³ por dia por trabalhador, o que é muito reduzido quando comparado com a pulverização mecânica.

Tanto a **mistura** a seco como a mistura húmida podem ser feitas recorrendo a betoneiras (Figuras 14 e 15). É preciso alguns cuidados com a utilização de betoneiras visto que o material húmido tende a agarrar-se às pás da betoneira prejudicando a homogeneização da mistura e aumentando os desperdícios. Idealmente as pás da betoneira deveriam rodar independentemente do tambor (Adam, 2001). Aquando da adição de água, este deve ser feita por dispersão e lentamente de modo a garantir uma homogeneização adequada da mistura.



Figura 15 - a) e b) Dosagem dos materiais. c) Mistura dos materiais recorrendo a betoneira elétrica.

A **moldagem** dos blocos é feita em prensas manuais ou mecânicas, sendo que as últimas têm rendimentos muito superiores. As prensas manuais permitem pressões de compactação desde 1 MPa a cerca de 4 MPa, sendo o mais comum de 2 MPa. A pressão irá variar com a quantidade de mistura húmida colocada no molde da prensa (dosagem da mistura) e da força dos operadores da mesma, sendo esta uma das grandes limitações das prensas manuais. As prensas manuais têm a vantagem de ser mais económicas em termos de utilização e transporte para o local de produção (geralmente na obra). Com uma prensa manual são necessários, pelo menos, 3 homens para a moldagem e transporte dos blocos para o local de cura (AVEI, 2014; Rigassi, 1985; Rix, 1998).



Figura 16 - a) Dosagem da mistura. b) Colocação da mistura na prensa. c) Moldagem do bloco.

A **cura** dos blocos é uma fase de extrema importância na garantia de qualidade dos mesmos, evitando a sua fendilhação superficial por secagem rápida e permitindo as reações de hidratação com os estabilizadores utilizados. Em blocos não estabilizados procede-se a uma cura seca, existindo apenas o cuidado de tapar os blocos com uma lona de plástico ou outro material de modo a evitar uma secagem demasiado rápida. Em blocos estabilizados, o processo de cura já depende do tipo de estabilizador utilizado. Porém, a prática comum implica uma cura húmida durante os primeiros 7 dias após desmoldagem, seguido de uma cura seca durante os próximos 21 dias (28 no total), semelhante ao preconizado para o betão. A cura húmida é responsável por garantir que os blocos tenham um teor de humidade adequado para a realização das reacções de estabilização, no caso de se utilizarem ligantes hidráulicos. A fase de cura seca (às vezes chamado de período de secagem) deve permitir a evaporação lenta da humidade de modo a que a argila seque lentamente aumentando a coesão do bloco. A cura deve ser feita, idealmente, ao abrigo da exposição solar direta e da ação do vento (AVEI, 2014; Rigassi, 1985; Rix, 1998).



Figura 17 - Cura dos blocos: Blocos tapados com lona plástica após rega com água.

Para além do tipo de terra, e a inclusão ou não de um estabilizador e a sua percentagem, o processo de produção dos BTC tem uma influência significativa na qualidade final dos mesmos (AVEI, 2014; Bahar et al, 2004; Kerali, 2001; Rigassi, 1985). Resumidamente, os fatores que mais influenciam a qualidade dos blocos na fase de produção são: a quantidade de água na mistura; a pressão de compactação; e as condições de cura.

2.5.4. Processo de construção de alvenarias com BTC

O primeiro passo para qualquer tipo de solução construtiva passa pela preparação do terreno, procedendo-se à compactação e nivelamento do solo imediatamente abaixo da camada de solo arável. A construção em terra é ainda mais suscetível à ação da água do que as restantes soluções construtivas, mesmo quando estabilizado com cimento, pelo que se deve construir fundações de modo a evitar o contacto entre a humidade do terreno e a construção. Deve-se também garantir um sistema de drenagem adequado. As fundações mais correntes são realizadas em betão (lajes finos), mas podem também ser utilizadas soluções em pedra ou tijolos cerâmicos maciços. É aconselhada, a aplicação de uma barreira para-vapor entre as fundações e o início das paredes de BTC. Os materiais aplicados nas fundações e na barreira para-vapor dependem do orçamento disponível para a construção, sendo que varia muito de países em desenvolvimento para países desenvolvidos.

A construção de paredes de BTC segue o mesmo processo que a construção em alvenaria de tijolo ou blocos de betão. Independentemente do tipo de BTC utilizado este deve ser aplicado de forma a evitar que as juntas verticais se sobreponham. Os blocos podem ser assentes sem argamassa mas é mais comum a utilização de uma argamassa à base da própria terra usada na produção dos blocos. No entanto, a primeira fiada de blocos deve ser argamassada às fundações (com barreira pára-vapor) com uma argamassa cimentícia de modo a garantir a ligação entre as paredes e as fundações. No caso de aplicação de blocos perfurados, as paredes podem ser armadas argamassando elementos de reforço (varões de aço, canas de bambu, etc) nos seus vazios (Figura 18).



Figura 18 - Processo de construção em BTC, levantamento das paredes. (projeto startup da DwellEarth em Moçambique 2013)

A argamassa utilizada pode ou não ser estabilizada de modo a garantir a compatibilização com os blocos utilizados. No caso de se optar por uma argamassa com ligante este deverá ser utilizado numa proporção superior ao dos próprios blocos, pois a terra no bloco foi sujeita a compactação e por isso apresenta maior resistência (Barbosa, 1996; Lourenço, 2002). Não se devem utilizar argamassas de apenas areia e cimento por falta de adesão e compatibilidade com os blocos (Barbosa, 1996). Os pressupostos enunciados para a argamassa das juntas são válidos para eventuais rebocos utilizados. Conforme já foi referido, a utilização de reboco não é necessário mas pode ser utilizado por razões estéticas ou como proteção em zonas de elevada exposição à água. No entanto, segundo Lourenço (2002) o ligante mais eficaz para o reboco de paredes de BTC é a cal, pois os rebocos de cimento não são compatíveis devido à sua elevada rigidez. A aplicação de estuque no interior das construções também é possível. Todo e qualquer revestimento, com exceção da barreira para-vapor, devem ser permeáveis devido à higroscopicidade dos seus blocos.

Independentemente da função da parede de BTC (autoportante ou apenas de enchimento) recorre-se sempre a uma viga de coroamento em betão armado ou em madeira. A viga de coroamento distribui as cargas pelas paredes, reforça a sua estabilidade e serve como ponto de ancoragem da cobertura. As coberturas usadas são geralmente executadas em madeira e revestidas por telhas ou chapas metálicas. A cobertura deve ser concebida de modo a evitar o acesso de água pluvial às paredes e ao interior da construção. Deve-se evitar o seu assentamento direto sobre os blocos, assentando-se preferencialmente sobre uma viga de coroamento conforme explicado no parágrafo anterior.



Figura 19 – Processo de construção em BTC: a) Construção da viga de coroamento. b) Construção do telhado. (imagens retiradas do projeto startup da DwellEarth em Moçambique 2013)

Os BTC permitem a construção de arcos, abóbadas e cúpulas. Os arcos são utilizados como forma de abrir vãos sem se recorrer a outros materiais, tirando partido da resistência à compressão dos blocos. Na abertura de vãos como janelas e portas deve-se recorrer à construção de lintéis em outro material (madeira, betão, pedra) no caso de não se optar por arcos. As tubagens de eletricidade e de água devem passar de preferência pelo pavimento ou sob o teto. Não se devem abrir roços nos BTC, especialmente no que se refere á rede de água, devido ao risco de rutura da rede. Se forem aplicados BTC perfurados então, apenas a rede elétrica deverá passar pelos vazios. Pelo interior, todas as paredes junto a zonas de contacto com água devem ser revestidas com materiais impermeáveis (Lourenço, 2002).

2.5.5. Vantagens e desvantagens dos BTC

Em seguida destacam-se as principais vantagens e desvantagens da utilização da técnica dos BTC frente às outras técnicas de construção em terra apresentadas.

Vantagens

- Prensagem do BTC torna o bloco mais resistente e durável em relação ao adobe;
- Blocos mais pequenos que os de adobe;
- Menos desperdícios em relação à produção de adobe;
- Podem ser empilhados durante o processo de cura necessitando de menos espaço para este efeito em relação ao adobe;
- Maior aceitação social que o adobe, devido à compactação e à estabilidade dimensional;
- Maior simplicidade na produção e execução de paredes face à taipa;
- Elevada estabilidade dimensional dos blocos, tornando a sua aplicação em obra mais eficiente;
- Permite o armamento de paredes e passagem de tubos sem a abertura de roços (caso de BTC perfurados).

Desvantagens

- São mais pesados que os blocos de adobe, dificultando o seu transporte;
- A sua produção manual é mais árdua que a produção manual de adobe;
- As dimensões dos blocos estão limitadas pelos moldes das prensas disponíveis;
- As arestas dos blocos danificam-se frequentemente em impactos acidentais aquando da aplicação em obra (como também sucede com os blocos de adobe).

2.6. Regulamentação da construção em terra, e com os BTC

2.6.1. A necessidade da regulamentação da construção em terra

O crescimento do interesse na terra como material de construção, para além do seu valor cultural, tem provado as suas mais-valias ambientais (menor consumo energético, facilidade de reciclagem, higroscopicidade, etc) e a sua versatilidade (paredes autoportantes, material de enchimento de estruturas, rebocos e argamassas, etc) entre outros. A evolução do interesse demonstrado implica a necessidade de documentos normativos que regulem a aplicação do material e as responsabilidades dos intervenientes, contribuindo para uma maior confiança na utilização dos BTC.

A regulamentação existente da construção em terra ainda é escassa e bastante dispersa pelo mundo. Os critérios utilizados nas regulamentações existentes não são idênticos, pelo que a estandardização de procedimentos e ensaios ainda se encontra muito distante, sendo mais uma barreira para a aceitação da terra, e dos BTC, como material de construção. Como forma de exemplo, Cid-falceto et al (2012) e Cid-Falceto (2012) estudaram a diferença de resultados obtidos no mesmo material, utilizando diferentes normas referentes aos mesmos ensaios de erosão (drip test e spray test). Concluiu-se que a diferença entre os critérios de avaliação dos ensaios, torna as normas impossíveis de serem comparadas entre si, obtendo-se resultados diferentes (no mesmo material) em cada norma. Segundo Lourenço (2002) um dos problemas da normalização da terra crua para a construção refere-se à falta de concordância entre os resultados obtidos em laboratório e os obtidos em condições de exposição real.

2.6.2. Estado atual da regulamentação para as construções em terra

Alguns dos países cuja atividade normativa está em curso na área de construção em terra são; a Alemanha, a África do Sul, a Austrália, o Brasil, o Chile, a Colômbia, o Equador, a Espanha, os EUA, a França, a Índia, a Nova Zelândia, o Peru, o Reino Unido, a Quênia, o Zimbabwe, entre outros. Portugal não faz parte do conjunto de países com regulamentação em construções em terra.

Os maiores potenciadores da construção em terra na Europa são a França, a Alemanha e a Espanha. Na França, o grupo CRATerre, referência internacional para a construção em terra, desenvolve um trabalho indispensável no que toca ao desenvolvimento sustentável. A França tem documentos normativos criados desde o fim da Segunda Guerra Mundial, e tem a sede das organizações internacionais RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les matériaux et les constructions) e CIB (Conseil International du Bâtiment pour la recherche, l'étude et la documentation) responsáveis por elaborar recomendações e especificações técnicas para a construção em terra (Lourenço, 2002). A Alemanha, para além das normas DIN 18951 (após a Segunda Guerra) também tem um projeto de normalização, conhecido por "Lehmbau Regeln", contendo um estudo relativo ao estado de arte da construção em terra, com recomendações técnicas para a construção em terra (Pacheco-Torgal et al., 2009). Em Espanha os documentos

normativos são recentes, sendo o primeiro elaborado apenas em 1992, mas destacam-se por ser o primeiro país Europeu com um documento normativo apenas referente aos BTC (Cid-falceto et al., 2011).

A Austrália e a Nova Zelândia são, em conjunto com a França e alguns países da América Latina, dos maiores potenciadores da regulamentação para a construção em terra, sobretudo com BTC. O “bulletin 5” foi publicado em 1952, sendo a primeira regulamentação específica sobre a construção em terra. Mais recentemente, em 2002, foi publicado o Manual Australiano de construção em terra. O referido manual reúne um conjunto de recomendações e boas práticas da construção em terra (Pacheco-Torgal et al., 2009). Segundo Cid-falceto et al., (2011), a Nova Zelândia tem o regulamento mais completo a nível internacional para a construção em terra, podendo-se equiparar às normas de outros materiais utilizados atualmente. Destacam-se três documentos, os NZS 4297-4299 (1998), que englobam várias técnicas de construção, descrevendo detalhadamente todas as fases de construção da taipa, do adobe e dos BTC e ainda uma descrição detalhada dos procedimentos referentes aos ensaios propostos.

No continente africano, apesar de existirem alguns países com normas nacionais sobre as várias técnicas de construção em terra (Quênia, Tunísia, Zimbabué), existem as normas regionais ARS 670-683 (14 no total) apenas sobre BTC. Estas normas foram preparadas em França pela CRATerre, em conjunto com o CDI (Centre pour le Développement Industriel) (Lourenço, 2002). Na América Latina destaca-se o Brasil, com 13 normas sobre o solo-cimento (BTC; cilindros de solo-cimento; taipa), a Colômbia que adota a norma NTC 5324 (apenas sobre BTC) baseada na norma Francesa e o Perú que tem normas sobre a construção sismo-resistente de soluções em adobes estabilizados com betume (Cid-falceto et al., 2011).

2.6.3. Principal conteúdo da regulamentação das construções em terra

Cid-falceto et al., (2011) e Cid-Falceto, (2012) analisaram 91 documentos normativos da construção em terra, de todo o mundo. No seu trabalho concluíram que 74% dos documentos tratam apenas uma única técnica de construção (adobe, taipa ou BTC) e que 27% dos documentos consideram a utilização da terra como material de construção apenas se esta for estabilizada.

Cid-falceto et al., (2011) referem que todas as normas fazem referência à seleção dos solos a utilizar e definem parâmetros e recomendações para o mesmo. No entanto, concluem que a maioria das recomendações se baseia em ensaios pouco precisos ou não quantificáveis. No que se refere aos requisitos para os produtos em terra, são indicados requisitos mínimos para as características geométricas, físico-químicas, mecânicas, higrométricas, etc. No caso dos BTC, a maioria das normas caracterizam os mesmos em função do tipo e geometria dos blocos. A caracterização mecânica baseia-se essencialmente nos valores da sua resistência à compressão.

Devido á complexidade do material terra, a regulamentação para a construção em terra é bastante autónoma, referindo-se para cada técnica de construção em terra ensaios específicos. Cid-falceto et al., (2011) referem que em muitas das normas analisadas, encontram-se referências a

normas nacionais noutros domínios de conhecimento. Existe assim uma elevada disparidade nos procedimentos de ensaio para as diferentes técnicas de construção em terra.

2.6.4. Conclusões

A grande maioria das normas tratam apenas uma técnica de construção em terra e promovem a estabilização da terra para a sua utilização na construção. A conjuntura atual de documentos normativos da construção em terra é mais uma prova de que o BTC é o futuro da construção em terra. No entanto, de modo a poder haver comparações diretas entre as diferentes normas internacionais é necessário homogeneizar os ensaios aplicados às diferentes técnicas de construção em terra.

Reforçando o referido por Cid-falceto et al., (2011) e Lourenço, (2002), os resultados dos ensaios laboratoriais atuais diferem muito dos resultados referentes a condições reais de exposição. Acrescenta-se também que alguns parâmetros definidos nas normas para a seleção de um solo são poucos precisos ou apenas quantitativos. Estas constatações devem ser tidas em conta quando se trata da construção em terra, procurando-se sempre complementar os mesmos com boas práticas de construção vindas da utilização de outros materiais e processos construtivos na construção.

Como referido, Portugal não tem regulamentação para a construção em terra. A falta de regulamentação nacional pode ser responsável pela reduzida aceitação da construção em terra no nosso país. De modo a que a construção em terra consiga atingir uma maior aceitação nacional, na regulamentação, terá que se incluir recomendações para zonas sísmicas. A falta de documentos normativos Nacionais foi uma das dificuldades mais sentidas na campanha experimental do presente trabalho, tendo que se adotar normas internacionais ou adaptar normas nacionais referentes a outros materiais de construção.

2.7. Formulação dos BTC

Cerca de 80 a 90% do volume de um BTC é composto por terra, tornando a sua seleção e caracterização o primeiro passo na formulação dos BTC. Uma vez estabelecidas as características desejadas para a terra, é necessário estabelecer as proporções de água e de estabilizadores a incorporar.

2.7.1. Caracterização da terra para BTC:

As características mais importantes da terra para a formulação dos BTC são a sua granulometria e os seus limites de consistência. Conforme referido, existem diferenças nas classificações granulométricas entre as diferentes regulamentações existentes. De modo a englobar a maioria das regulamentações e consequentes investigações sobre BTC, e devido à maior simplicidade experimental (ver capítulo 3) decidiu-se considerar em conjunto as frações argilosas e siltosas do solo. Isto é, no presente trabalho, todas as partículas com dimensões menores a 0,074mm

serão considerados como argila/silte. Apesar de a argila apresentar maior coesão e plasticidade do que a silte, este também contribui para estas propriedades.

Atualmente ainda não existe um consenso geral sobre as características ideais da terra para a produção de BTC. Na Tabela 2 apresentam-se alguns valores de referência para a granulometria e limites de consistência, tendo por base diferentes autores.

Tabela 2 – Características gerais da terra para a produção de BTC

Autor	Granulometria (%)			Limites de consistência	
	Seixo (fino)	Areia	Argila/silte	LL	IP
Rigassi (1985)	0 - 40	25 - 80	18 - 55	-	-
Barbosa (1996)	-	50 - 70	20 - 40	-	-
Pacheco-Torgal et al. (2009)	-	-	-	7 - 18	30 - 35
Burroughs (2008)	-	<64	20 - 35	30 - 40	15 - 20
Delgado et al. (2007)	-	-	20 - 47	25 - 50	2 - 30

Considerou-se os trabalhos de Burroughs (2008) e Delgado et al. (2007) como sendo os mais completos neste domínio. Burroughs (2008) ensaiou mais de 100 solos diferentes para a construção em taipa estabilizada (as diferenças para BTC são pouco relevantes) e Delgado et al. (2007) analisaram vários documentos normativos sobre a construção em terra não estabilizada. Assim, na Tabela 3, resumem-se as características do solo desejadas para este trabalho.

Tabela 3 - Características da terra para a produção de BTC (Barbosa, 1996; Burroughs, 2008; Delgado et al., 2007; Pacheco-Torgal et al., 2009; Rigassi, 1985)

	Estabilizados	Não Estabilizados
Seixo (fino)	0 - 30%	
Areia	25 - 70%	
Argila/silte	20 - 35%	22 - 45%
LL	25 - 40	25 - 50
IP	2 - 20	2 - 30

2.7.2. Quantidade de água a utilizar na produção dos BTC:

A maioria das investigações com BTC utiliza o teor ótimo em água (TOA) como o teor de humidade de moldagem dos blocos. Para tal, a grande maioria dos autores recorrem ao ensaio Proctor (compactação laboratorial) ou ao ensaio de drop test (expedito, in-situ). Segundo Lourenço (2002), citando a organização da CRATerre, são sugeridos valores entre os 9 e 17% para o teor de humidade. Bahar et al. (2004) reporta teores de humidade entre os 9.5 e 11%. Riza et al. (2010) fizeram um resumo das propriedades dos BTC estudados, definindo um intervalo ótimo de 10 a 13% para o teor de humidade. As percentagens referem-se à massa de terra utilizada.

2.7.3. Incorporação de estabilizadores nos BTC:

De acordo com a bibliografia consultada, na Tabela 4 indicam-se dosagens recomendadas para a incorporação de estabilizadores em BTC.

Tabela 4 - Incorporação de estabilizadores em BTC

Estabilizador	Documento consultado	Proporção (%)	Observações
Cimento	Rigassi (1985)	4-10	Manual de produção de BTC da CRATerre
	Adam (2001)	3-18	Livro técnico de BTC em Sudan
	Kerali (2001)	3-10	5-8% Mais adequado para BTC
	Lourenço (2002)	6-12	Construção em terra no geral
	Walker (1995)	5-10	<5% Arestas tornam-se friáveis >10% Economicamente inviável
	Riza et al. (2010)	4-10	Faz referência a documento: de Walker, (2002)
	Osula (1996)	0,5-4	Só adequado para amassadura em laboratório
	Namango (2006)	3-12	4-10% Mais adequado para BTC >3% Preenchimento de vazios
	Ngowi (1997)	3-12	3-6% Diminuição da absorção de água apenas >6% Diminuição da absorção de água com aumento da resistência mecânica.
Cal	Rigassi (1985)	6-12	Manual de produção de BTC da CRATerre
	Adam (2001)	>6	Recomenda a utilização do dobro da % de cimento
	Lourenço (2002)	6-12	Construção em terra no geral
	Osula (1996)	0,5-4	Só adequado para amassadura em laboratório
	Pacheco-Torgal et al. (2009)	3-10	Construção em terra no geral

Em suma, tem se em média que as proporções recomendadas para a adição de cimento e cal são de cerca de 4-10% e 6-12%, respetivamente.

Apesar de haver limites estabelecidos para a formulação dos BTC, a elevada e complexa heterogeneidade do solo, faz com que qualquer generalização sobre o mesmo conduza a incorreções. Assim, considera-se que os limites apresentados servem apenas como guia para a produção dos BTC e não como valores rígidos a cumprir.

2.8. Propriedades dos BTC

No ponto seguinte serão abordadas as principais propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos BTC, analisando-se os fatores que as influenciam. Serão apresentados quadros resumo com estas propriedades, tendo por base a bibliografia consultada. Note-se que nos referidos quadros a “%finos” corresponde à fração argilosa e siltosa da terra (dimensão menor que 0,074mm).

2.8.1. Propriedades mecânicas

Nos pontos em seguida são analisados a resistência à compressão e à tração, tanto por flexão como por compressão diametral, dos BTC.

2.8.1.1. Resistência à compressão

Na maioria dos documentos normativos, a resistência à compressão é a propriedade usualmente considerada para a classificação dos BTC. Em geral, a resistência à compressão dos BTC depende essencialmente do tipo de terra, do tipo e proporção de estabilizador, do teor de humidade, da pressão de compactação, da geometria do bloco, do procedimento de ensaio e do controlo de qualidade da produção. Nos pontos em seguida faz-se referência a cada um desses fatores.

- Tipo de terra

Conforme referido, a terra é o constituinte maioritário do volume do bloco (cerca de 80 a 90%) pelo que as suas características influenciam significativamente as propriedades do bloco.

- Tipo e proporção de estabilizador

Existe uma forte relação entre a resistência à compressão e a proporção de estabilizador, que muitas vezes verifica-se ser linear (Riza et al., 2010). A utilização de diferentes estabilizadores pode afetar de forma muito distinta a resistência dos blocos, como por exemplo o caso do cimento face à cal. Na seleção da proporção de estabilizador deve-se ter em atenção a resistência pretendida, a viabilidade económica da solução e a compatibilidade terra-estabilizador nos casos de proporções elevadas.

Neste ponto pode-se englobar a **cura e a idade** dos blocos ensaiados, na medida em que ambos se relacionam com a utilização (ou não) de um estabilizador e com as suas propriedades. A cura é responsável por garantir a eficiência das reações de hidratação dos estabilizadores no caso de materiais cimentícios e, dependendo da progressão destas reações, influenciam diretamente na coesão entre partículas (resistência do bloco).

- Teor de humidade

A resistência à compressão de um bloco seco será maior que num bloco húmido ou saturado. A presença de água no interior do bloco diminui a coesão entre partículas, ou pela dispersão de aglomerados de argila que não foram estabilizados ou pela criação de pressões intersticiais (Morel et al., 2007; Riza et al., 2010; Walker, 1995). Quando um bloco é sujeito a compressão, as pressões intersticiais criadas aumentam o rompimento das ligações entre partículas, efeito mais visível nos blocos saturados.

Os documentos normativos variam em relação ao teor de humidade exigido no ensaio dos blocos, sendo que alguns requerem a resistência à compressão no estado saturado e outros no estado seco. Em termos de aplicação do BTC em obra, este nunca se encontrará totalmente seco nem totalmente saturado, correspondendo estes estados a extremos opostos muito improváveis de ocorrer. Daqui se conclui que, no caso de ser necessário classificar os BTC, deve-se optar por um documento normativo em vigor e utilizar o teor de humidade nele prescrito. Morel et al. (2007) sugere

que os BTC deveriam ser classificados em função da sua resistência seca e não a resistência saturada conforme a maioria dos documentos normativos de BTC. No caso de se querer determinar a resistência de um BTC para a sua aplicação em obra, este deve ser ensaiado com um teor de humidade próximo do teor esperado para o local da obra.

É possível considerar também a influência do **teor de humidade de produção** dos blocos, pois conforme já apresentado, a eficácia da compactação do solo (moldagem dos BTC) é tanto maior quanto mais próximo o mesmo estiver do seu teor ótimo em água.

- Pressão de compactação

A pressão de compactação é um dos fatores responsáveis pelo aumento da massa volúmica dos blocos, devido ao rearranjo das partículas, que aumenta os pontos de contacto entre estes e aumenta a compactidade. Verifica-se que o aumento da massa volúmica de um solo influencia diretamente a sua resistência mecânica e a sua durabilidade (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; K. M. a Hossain et al., 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998; Riza et al., 2010; Walker, 1995).

- Geometria do bloco e procedimento de ensaio

Morel et al. (2007) estudou a influência da geometria dos blocos na resistência à compressão dos mesmos, concluindo que a mesma é significativa. O mesmo refere-se ao ensaio de blocos inteiros, colocados na mesma posição que aplicadas em obra (posição de moldagem), pelo que existe o efeito de confinamento lateral pelos pratos da prensa no ensaio, e o atrito sentido na moldagem do bloco. O confinamento lateral resulta num ganho aparente de resistência dependendo da razão entre a espessura e a largura do bloco e a influência do atrito na moldagem torna a massa volúmica do bloco (e a sua resistência) variável em altura, sendo maior na face em que atua o prato da prensa. Alguns países como a Nova Zelândia e a Austrália apresentam fatores de correção possíveis de aplicar, dependendo da razão altura-largura do bloco, permitindo assim a utilização de várias dimensões de blocos.

Outros documentos normativos de países como a França, o Brasil e muitos países africanos (seguem as normas ARS) utilizam o ensaio tipo RILEM. Este consiste no ensaio de um provete constituído por dois meios blocos sobrepostos unidos por uma junta de argamassa ao invés de se utilizar um bloco inteiro, procurando assim diminuir o efeito de confinamento lateral. Contudo Morel et al. (2007) afirma que este ensaio subestima de certa forma o valor da resistência à compressão dos blocos.

Kerali (2001) considerou ainda a velocidade de aplicação da carga no ensaio de compressão como fator que influencia a sua resistência. Baseou-se em estudos extensivos sobre o betão em que os provetes ensaiados apresentavam maiores resistências quanto mais rápido fosse a velocidade de aplicação da carga. Deste modo conclui-se que o ensaio deve ser suficientemente lento de modo a se obterem valores mais próximos da realidade.

- Controlo de qualidade na produção

Este fator não é mesurável, mas como qualquer produto fabricado, por mais industrial que seja a sua produção, vai ter consequências diretas na qualidade do produto. Os fatores de produção que mais afetam a qualidade dos blocos são referidos em 2.4.3.

Na Tabela 5 resumem-se alguns valores de resistência à compressão de BTC estabilizados e não estabilizados (NE), reportados por outros autores. De modo a simplificar a Tabela 5, os principais fatores que influenciam a resistência dos blocos apresentam-se no Anexo I.

Tabela 5 – Resistência média à compressão de BTC, reportado por diferentes autores

Doc. Consultado	Resistência à compressão (MPa)				
	Estabilizador		Teor humidade (ensaio)	Idade (dias)	
	Tipo	(%)		7	28
Walker (1995)	Cimento	5 - 10	Saturado	-	2.13 - 3.62
			Seco		3.45 - 6.81
Ngowi (1997)	NE		Seco*	-	1.8
	Cimento	7.5			6.0
	Cal				3.1
Kerali (2001)	Cimento**	7 - 9	Saturado	-	4.57 - 6.54
			Seco		7.33 - 9.66
Krosnowski (2011)	Cimento	6	Saturado	3.10 - 3.59	2.21 - 4.75
Namango (2006)	NE		Seco	-	4.8
	Cimento	5 - 9			3.51 - 5.97
Lourenço (2002)	Cimento	8	Seco	-	2 - 5
			Saturado		0.2
Elenga (2011)	NE**		Ambiente (NR)	2.8 - 3.3	3.3 - 3.5
Bahar et al. (2004)	NE		Seco	1.2	1.6
	Cimento	6 - 10		2.5 - 3.1	3.1 - 4.1
				Saturado	-

Legenda: NE: Não estabilizado, NR: Não referido no documento, *Assumido por falta de informação, ** Bloco produzido com pressão de compactação de 6MPa.

Em suma, para percentagens entre os 4 e 10% de cimento, são indicados valores médios de resistência à compressão seca de 3 a 6,3 MPa. No estado saturado, os mesmos valores médios, são de 1,7 a 3 MPa. Nos blocos não estabilizados, a sua resistência média no estado seco, é de 2,2 a 2,8 MPa.

2.8.1.2. Resistência à tração

Como qualquer elemento construtivo em terra, os BTC são concebidos para funcionarem à compressão, no entanto, os blocos devem ter alguma capacidade resistente á tração. Ao longo da vida útil dos blocos, os mesmos, podem ser sujeitos a tensões de tração, quer na fase de cura, quer no período posterior a assentamentos diferenciais de fundações ou cargas concentradas em paredes, entre outras ações.

Tal como acontece com a resistência à compressão, a resistência à tração depende do tipo de ensaio. Idealmente a resistência à tração de um material de construção (BTC ou não) deveria ser obtido através do ensaio de tração axial. No entanto, este ensaio não é viável devido às dificuldades de aplicação de forças de tração axial sem introduzir excentricidades. Portanto, recorre-se geralmente a ensaios de tração indiretos, nomeadamente por flexão ou por compressão diametral. Contudo, é sabido, da caracterização de elementos de betão, que tanto o ensaio à tração por compressão diametral, como por flexão, sobrestima a resistência à tração do elemento. Isto ocorre porque a distribuição de tensões de tração é diferente em cada um dos ensaios mencionados (Araújo, 2001; Costa et al., 2002).

Vários são os autores (Hossain, Lachemi, & Easa, 2007; Krosnowski, 2011a; Medjo Eko et al., 2012; Morel et al., 2007; Namango, 2006; Taallah et al., 2014; Walker, 1995) que verificam a existência de uma razoável relação entre a resistência à compressão a resistência à tração, tanto por flexão como por compressão diametral, nos BTC. Como tal, pode-se assumir que os fatores que influenciam a resistência à compressão são os mesmos que afetam a resistência à tração. Estes fatores já foram referidos em 2.8.1.1. Apresenta-se na Tabela 6 e na Tabela 7 valores da resistência à tração dos BTC reportado por outros autores.

Tabela 6 – Resistência à tração por flexão de BTC reportado por diferentes autores

Doc. Consultado	Resistência à tração por flexão f_{ctm} (MPa)						
	Solo (% Finos)	Estabilizador Tipo	Estabilizador (%)	Teor humidade	Idade (dias)	Resultados (MPa)	
Walker (1995)	Arenoso argiloso (35-50%)	Cimento	5, 6.7, 10	Saturado (24h)	28	% Cimento	f_{ctm} (MPa)
						5	0.19
						6.7	0.34
Namango (2006)	Argiloso (48%)	NE, cimento	5, 9	Seco	28	10	0.52
						NE	0.99
						5	0.75
Elenga (2011)	Muito argilosos (S1: 64%, S2: 70%)	NE, fibras de plástico	-	Equilíbrio	28	9	1.57
						S1 (IP: 25)	1.51
Krosnowski (2011)	Arenoso argiloso (S1: 37%, S2: 38%)	Cimento	6	Saturado (1.5h)	28	Solo:	f_{ctm} (MPa)
						S1 (IP: 13)	0.46
Elenga (2011)	Muito argilosos (S1: 64%, S2: 70%)	NE, fibras de plástico	-	Equilíbrio	28	S2 (IP: 15)	0.51
						S2 (IP: 38)	1.57

Legenda: NE: Não estabilizado

O ensaio de flexão nos BTC é um ensaio muito mais simples e menos oneroso do que o ensaio à compressão (Morel et al., 2007; Rigassi, 1985; Walker, 1995). Os mesmos afirmam que, in-situ, o ensaio à flexão é a forma mais eficaz de estimar a resistência à compressão de um bloco, sendo este ensaio considerado pelos mesmos como um “ensaio indireto de resistência à compressão”. Os referidos autores afirmam que, a caracterização à flexão aliado à medição da

massa volúmica e absorção de água (por imersão) permitem estimar de forma eficaz a qualidade de um bloco in-situ (resistência e durabilidade).

Tabela 7 - Resistência à tração por compressão diametral de BTC reportado por diferentes autores

Documento consultado	Resistência à tração por compressão diametral $f_{ctm,sp}$ (MPa)						
	Solo (% Finos)	Estabilizador Tipo	Estabilizador (%)	Teor humidade	Idade (dias)	Resultados (MPa)	
Arabani et al. (2007)	Arenoso argiloso (36%)	Cal	6	Seco	2	0.21	
Bahar et al. (2004)	Muito argiloso (62%, IP: 15)	NE, cimento	4, 8	Seco	28	% Cimento $f_{ctm,sp}$ (MPa)	
						NE	0.24
						4	0.5
8	0.74						
Taallah et al. (2014)*	Arenoso argiloso (28%, IP: 13)	Cimento, fibras naturais	8	Seco	28	8	1.6
Hossain et al. (2007)	Argiloso (51%, IP:19)	NE, cimento, cal	4	Saturado	28	Estabilizador $f_{ctm,sp}$ (MPa)	
						NE	0.015
						Cimento	0.096
Cal	0.068						

Legenda: NE: Não estabilizado, * usou pressão de compactação de 10MPa

O estudo da resistência à tração dos BTC é geralmente efetuado sobre blocos com incorporação de fibras (estabilização física) sendo esta a forma mais simples e eficaz de aumentar a resistência à tração (Medjo Eko et al., 2012; Namango, 2006; Taallah et al., 2014). A maioria dos valores apresentados na Tabela 6, consideram a incorporação de fibras. No presente trabalho, os blocos não terão a adição de fibras, portanto é esperado que os resultados obtidos neste trabalho sejam inferiores aos apresentados com a adição de fibras.

2.8.2. Propriedades físicas

2.8.2.1. Massa volúmica

A massa volúmica traduz-se simplesmente pela razão entre a massa do bloco e o seu volume, que pode ser expressa de várias formas dependendo do seu teor de humidade. A massa volúmica dos BTC depende do tipo de solo utilizado (granulometria e densidade das partículas), da pressão e tipo de compactação, do estabilizador utilizado, da quantidade da mistura compactada na moldagem do bloco e da tipologia do bloco (maciço, perfurado, etc) (Kerali, 2001; Morel et al., 2007; Riza et al., 2010; Walker, 1995).

É geralmente reconhecido que a massa volúmica dos BTC é proporcional à resistência e durabilidade dos mesmos (Adam, 2001; Chan et al., 2010; Galíndez, 2009; Kerali, 2001; Morel et al., 2007; Namango, 2006; Walker, 1995). De facto a maior ou menor massa volúmica traduz a porosidade dos blocos que se relaciona diretamente com a resistência mecânica, absorção de água, porosidade, permeabilidade, resistência á erosão, condutibilidade térmica, entre outros. A massa

volúmica tem uma importância tal que muitas normas internacionais sobre BTC (França, ARS) utilizam-na como critério de aceitação ou não dos blocos produzidos. Na Índia, a resistência à compressão dos BTC é controlada pela sua massa volúmica (Morel et al., 2007). Na Tabela 8 resumem-se massas volúmicas secas reportados por diferentes autores na literatura consultada.

Tabela 8 - Massa volúmica seca de BTC reportado por diferentes autores

Documento consultado	Massa volúmica seca ρ (Kg/m ³)					
	Solo (% Finos)	Estabilizador	W Produção	P.C. (MPa)	Resultados	
					Estabilizador	ρ (Kg/m ³)
Namango (2006)	Argiloso (48%)	NE, cimento	3% > TOA	2 - 4	NE	1793
					Cimento (9%)	1686
Kerali (2001)	Arenoso argiloso (23%)	Cimento, cimento + cal	8.5%	6	Cimento (5-9%)	2100 - 2125
					Cimento (5-9%) + cal (5%)	2060 - 2080
Walker (1995)	Arenoso argiloso (35-50%)	Cimento	TOA	2 - 4	Cimento (5-10%)	1818 - 1853
Arabani et al. (2007)	Arenoso argiloso (5-36%)	Cal (6%)	95% TOA	NR	Cal (6%)	2080-2150
Ngowi (1997)	Argiloso (S2: 37% - IP: 26)	Cimento, cal	Drop test	2	Cimento (5-10%)	1810 - 1890
					Cal (5-10%)	1810 - 1950
Galíndez (2009)	Arenoso argiloso (10-23%, IP:8-16)	NE	NR	< 1*	NE	1614 - 1737

Legenda: NE: Não estabilizado, NR: Não referido no documento, W: Teor de humidade, TOA: Teor Ótimo de Água, P.C.: Pressão de compactação, * Cilindros compactados tipo Proctor leve.

2.8.2.2. Condutibilidade térmica

Visto que a construção em terra tem como uma das suas principais vantagens as suas características de isolamento térmico, procurou-se caracterizar esta propriedade. Na Tabela 9 resumem-se valores da condutibilidade térmica dos BTC reportados por outros autores.

A condutibilidade térmica dos BTC depende da composição (solo e estabilizador), massa volúmica e teor de humidade dos blocos (Bahar et al., 2004; Kerali, 2001; Riza et al., 2010). Apesar das diferentes terras apresentarem condutibilidades térmicas pouco variáveis entre si, a incorporação de agentes de estabilização pode alterar a condutibilidade térmica do bloco. A humidade dos blocos poderá ter um papel significativo na sua condutibilidade térmica pois a água tem uma condutibilidade térmica cerca de 25 vezes superior à da terra (Ashworth, 1991).

Tabela 9 - Condutibilidade térmica de BTC reportado por diferentes autores

Documento consultado	Condutibilidade térmica λ (W/m.K)			Observações
	Estabilizador		λ (W/m.K)	
	Tipo	Proporção (% em massa)		
Lourenço (2002)	Não estabilizado		0.81-0.93	Sem caracterização do solo
	Cimento	8	0.81-0.93	-
	Cal	12 a 19	0.93-1.04	P.C. de 30 MPa
Kerali (2001)	-	-	0.23-1.04	Valores gerais
Adam et al. (1995)*	Cimento	5	0.41-0.51	Estado: seco
			0.71-0.88	Estado: 5% teor de humidade
	Cal	6	0.25-0.46	Estado: seco
			0.44-0.80	Estado: 5% teor de humidade
Sampaio et al. (2014)	Não estabilizado		0.5	Estado: seco
			0.6-0.7	Estado: ambiente de laboratório

Legenda: P.C.: Pressão de compactação, * P.C. de 10MPa

2.8.3. Durabilidade

Apesar de todas as vantagens da utilização da terra na construção, é sobre a durabilidade das mesmas que a sociedade mais crítica sendo esta o maior entrave para a sua aceitação total. As construções em terra, se aliadas a boas práticas construtivas e ações de manutenção eficazes, têm durabilidades compatíveis com os materiais mais modernos da construção.

A durabilidade dos BTC é uma propriedade complexa de se definir. A mesma depende de vários fatores e mecanismos, que geralmente ocorrem em simultâneo, existindo incertezas associadas aos ensaios utilizados e a sua compatibilização com as condições reais (Cid-Falceto, 2012; Elenga, 2011; Heathcote, 2002; Kerali, 2001; Lourenço, 2002; Ogunye et al., 2002). Existem ainda outros parâmetros a analisar quando se define a durabilidade de um material de construção que são independentes do material em si como por exemplo a qualidade do processo de produção, a vida útil esperada do material e ainda a sua funcionalidade pretendida em obra (Lourenço, 2002). De forma abreviada tem-se que a durabilidade dos BTC depende de três fatores principais; a resistência mecânica do bloco, o mecanismo de deterioração e a qualidade da construção.

- A resistência mecânica é indiscutivelmente o fator mais importante pois um bloco com baixa resistência mecânica nunca poderá ser um bloco com elevada durabilidade.
- Existem três mecanismos de deterioração que afetam os BTC (Cid-Falceto, 2012; Kerali, 2001); deterioração por ação da água, deterioração por ação da temperatura e ainda deterioração química. Neste trabalho apenas se investigará o primeiro pelo que é sobre este que se irá desenvolver apenas. O mecanismo de deterioração por ação de água procede-se

ou por dissolução ou por erosão. Estes serão abordados nos pontos 2.8.3.1. e 2.8.3.2. respectivamente.

- Por qualidade da construção refere-se; à funcionalidade do bloco em obra, isto é, pode ser aplicado em paredes exteriores ou interiores, em zonas húmidas, entre outros; o acabamento do bloco; e ainda os pormenores de construção envolvidos. Os pormenores referem-se a todos aqueles cuja função é a proteção dos blocos como por exemplo a extensão do beiral do telhado, os sistemas de drenagem, a abertura de vão de janelas, a utilização ou não de um reboco, etc.

Apesar de não haver um consenso em como determinar a durabilidade de um BTC, os ensaios mais utilizados são os ensaios de absorção de água (por imersão ou por capilaridade), ensaios de resistência a abrasão (seco e saturado) e ainda ensaios de erosão (spray e drip test) (Cid-Falceto, 2012; Kerali, 2001; Ogunye et al., 2002). No entanto, os ensaios laboratoriais não são compatíveis com as condições reais de serviço dos blocos, sendo na sua maioria demasiado agressivos, subestimando desta forma a durabilidade dos blocos (Cid-falceto et al., 2011; Cid-Falceto, 2012; Heathcote, 1995; Lourenço, 2002; Ogunye et al., 2002). No presente trabalho irão se efetuar os ensaios de absorção e os ensaios de erosão mencionados. De modo a caracterizar as propriedades de transporte dos BTC, para além dos ensaios de absorção, irá-se medir a permeabilidade à água dos BTC.

2.8.3.1. Permeabilidade à água

A permeabilidade à água dos BTC, bem como a sua absorção de água são propriedades que dependem do desenvolvimento da estrutura porosa do material (Kerali, 2001). Ao longo da vida útil da estrutura a permeabilidade pode variar, devido ao aparecimento de microfissuras resultantes da variação higrotérmica dos blocos.

São escassos os trabalhos que fazem referência à caracterização desta propriedade nos BTC. Lourenço (2002), para blocos estabilizados com 8% cimento e compactados a 4MPa, refere permeabilidades de cerca de 1×10^{-8} m/s. Bahar et al. (2004) investigaram o efeito da estabilização da terra com cimento na permeabilidade à água. Para tal ensaiaram cilindros de terra (com 62% de argila e silte, e IP de 15) estabilizados com diferentes proporções de cimento, obtendo os resultados apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Permeabilidade de BTC (Bahar et al. 2004).

Cimento (%)	Permeabilidade (m/s)
Não estabilizado	Cilindro desagregou
5	14×10^{-8}
10	$7,5 \times 10^{-8}$
15	1×10^{-8}
20	$0,27 \times 10^{-8}$

2.8.3.2. Absorção de água

Dada a afinidade pela água das partículas de terra que compõem os blocos, é por força capilar que a água é atraída para o interior dos poros vazios dos mesmos, onde poderá permanecer durante largos períodos de tempo. A absorção de água resulta na desagregação de aglomerados de argila (e silte) não estabilizados e possivelmente na sua remoção (Kerali, 2001; Walker, 1995). Pelo que a resistência do bloco à ação da água resulta do poder de ligação entre as suas partículas, sendo fundamental a sua estabilização.

O ensaio de absorção de água por imersão, apesar de ser o mais utilizado dos dois, poderá não ser o ideal em termos de comparação com as condições de aplicação em obra a não ser que seja esperado a sua utilização em zonas de cheias recorrentes. É no entanto o mais simples de se realizar e poderá ser utilizado na fase de produção como controlo de qualidade, conforme referido anteriormente.

Tabela 11 - Absorção de água (imersão e capilaridade) em BTC reportado por diferentes autores

Absorção de água por imersão (A) e por capilaridade (C _b)								
Doc. Cons.	Solo (% Finos)	Estab.	Ensaio		Resultados			
			Tipo	Tempo	C _b (g/cm ² min ^{1/2})		A (%)	
Hossain et al. (2007)	Argiloso (51% IP:19)	NE, cimento, cal	C _b	10 min	Estabilizador	C _b (g/cm ² min ^{1/2})		A (%)
						7 dias	14 dias	
					NE	12.2	20.7	
					Cimento (4%)	8.1	13.8	
Bahar et al. (2004)	Muito argiloso (62% IP:15)	Cimento	C _b /A	10 min/ 72 h	Cimento (5%)	12.7	28.9	13.7
					Cimento (8%)	NR	NR	15.0
					Cimento (10%)	11.2	29.0	16.6
Cid-Falceto (2012)	Blocos industriais (Espanha): NE, cimento, cal + cânhamo	C _b /A	10 min/ 24 h	Cimento	5.75		13.6	
				Cimento branco	17.2		11.8	
				Cal + cânhamo	23.35		43.8	
Ngowi (1997)	Arenoso argiloso (37% IP:26)	NE, cimento, cal	A	24 h	Estabilizador (%)	A (%)		
					Cimento	5 - 10	8.5 - 7.03	
					Cal	5 - 10	10.99 - 11.26	
Taallah et al. (2014)**	Arenoso argiloso (28% IP:13)	Cimento	A	24, 48 h	% Cimento	A (%)		
						24 h	48 h	
Kerali (2001) ***	Arenoso argiloso (23%)	Cimento, cimento + cal	A	24 h	% Cimento	% Cal	A (%)	
					5 - 9	0	9.9 - 7	
					5 - 9	5	12.4 - 9.4	
Rix (1998)	Muito argiloso (82% IP: 35)	NE, cal, cimento + cal	A	24 h	0	4	Desagregou	
					6	4	9.9	
					8	4	9.5	
					7	7	8.6	

Legenda: Doc. Cons.: Documento consultado, Estab.: estabilizador NE: Não estabilizado, NR: Não referido no documento*Blocos NE desagregaram, ** Pressão de compactação de 10 MPa, *** Pressão de compactação de 6 MPa

2.8.3.3. Erosão por ação da água

Citado por inúmeros documentos da bibliografia consultada, Heathcote (1995) define o mecanismo principal de erosão (remoção de material) nos BTC como sendo a libertação de energia cinética pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do bloco. O impacto da gota de chuva em si é o responsável pela remoção do material, e no momento em que impacta o bloco, esta é pulverizada humedecendo (e amolecendo) a área do bloco em redor do local de impacto. O amolecimento do material do bloco é mais uma vez função do poder de ligação entre as partículas do mesmo.

Kerali (2001) refere como principais características da chuva; a dimensão das gotas, a sua distribuição, a sua velocidade de queda e a energia cinética de impacto. Heathcote (1995) estabelece como fatores responsáveis pela energia cinética produzida no impacto da gota de chuva numa parede de BTC como sendo; a intensidade da chuva, o ângulo de incidência (depende da intensidade do vento), a extensão dos elementos construtivos de proteção (beirais do telhado, soco das paredes, etc.) e da rugosidade da parede (quanto maior a rugosidade maior será a erosão superficial).

A erosão por ação da água resultará na perda do acabamento liso dos blocos (sem revestimento), reduzirá a dureza superficial, a rigidez, a densidade e a resistência mecânica do bloco. A erosão superficial aumentará a permeabilidade do bloco, tornando-a mais suscetível aos outros mecanismos de deterioração mencionados (Kerali, 2001).

As incertezas associadas aos ensaios de erosão por ação da água estão expressas nos trabalhos de (Cid-Falceto, 2012; Heathcote, 1995; Ogunye et al., 2002) no entanto são os mais utilizados nas avaliações de durabilidade em termos de resistência à erosão por ação da água mesmo.

Tabela 12 - Profundidade de erosão pelo ensaio de gotejamento (drip test) em BTC reportado por diferentes autores

Profundidade de erosão pelo ensaio de gotejamento (drip test)									
Doc. Consultado	Solo (IP)	Altura de queda (mm)	Carga da água (mm)	Tempo de exposição (min)		OBS	Resultados (mm): Profundidade de erosão		
				ΔT	Total				
Cid-Falceto (2012)	Blocos industriais (Espanha)	1000	1500	10	20	Fio de água com 5mm diâmetro	Tempo de exposição		
							10 min	20 min	
							4.3	7	
Galíndez (2009)	Argilosos arenosos (S1:13.4, S2:7.5, S3:15.8)	2000	2000	-	60	1 gota/seg	Solo		
							S1	S2	S3
							4.7	5	8
Silva et al. (2013)	Arenoso siltoso (IP:11)	400	460	>20 min e <60 min		100 ml de água	Erosão		P.P.H
							3		20

Legenda: Doc. Consultado: documento consultado, OBS: observações, P.P.H: Profundidade de Penetração de Humidade

Os valores da Tabela 12 referem-se aos resultados de ensaios de erosão por gotejamento (drip test) sobre blocos não estabilizados, inclinados num ângulo de 27° com a horizontal. Cid-Falceto, (2012) realizou este ensaio sobre blocos estabilizados tendo chegado à conclusão de que estes não eram erodidos pelo ensaio, e Silva et al., (2013) realizou este ensaio sobre um mini painel de taipa (solo adequado para BTC).

Tabela 13 - Profundidade de erosão pelo ensaio de erosão acelerada (spray test) em BTC reportado por diferentes autores

Profundidade de erosão (P.E.) pelo ensaio de erosão acelerada (spray test)												
Doc.	Tipo de solo	P.A. (kPa)	D (mm)	Tempo (min)		ϕ (mm)	Resultados (mm):					
				ΔT	Total		Estabilizador		P.E.			
Cid-Falceto (2012)	Blocos (ESP) *	50	470	15	60 / Rot.	150	Estabilizador		P.E.			
							NE	Rotura				
							Cimento	Sem danos				
		147	180	15	120 / Rot.	150	Cal e cânhamo		12.5mm			
							NE	Rotura				
							Cimento	Sem danos				
Cal e cânhamo		17.75mm										
Exelbirt (2011) **	Arenoso argiloso (13%)	2070	510	15	60 / Rot.	100	Cal (%)	Cimento (%)	P.E. 15min - 60min	P.A. (kPa)		
							0	7	0.51 - 0.89	4140		
		4140	7	5	20.32 - 25.40		4140					
					17.78 - 21.59		2070					
		Rix (1998)	Muito argiloso (82% IP: 35)	70	470	15	60 / Rot.	100	4	0	20 - Rotura	
									4	6	9 - 15	
4	8								7 - 10			
7	7								6 - 8			

Legenda: NE: Não estabilizado, P.A.: Pressão de água, D: distância entre o bloco e a saída do jacto de água, ϕ: diâmetro da área circular do bloco exposto ao jacto de água, Rot. : Rotura do provete, * Blocos industriais produzidas em Espanha, ** Pressão de compactação de 8MPa

3. Campanha experimental

De modo a contribuir para um melhor conhecimento na utilização de BTC como material de construção foram produzidas e caracterizadas BTC, com e sem estabilização. No presente capítulo apresenta-se uma descrição detalhada do plano de trabalhos, materiais utilizados, processo de produção adotado, e ensaios de caracterização realizados durante a campanha experimental.

3.1. Descrição geral da campanha experimental

A campanha experimental foi dividida em 5 fases que envolveram: a seleção e caracterização dos materiais constituintes; a produção de blocos experimentais; a formulação e definição das composições dos BTC; a produção dos blocos; a caracterização dos blocos no estado fresco e no estado endurecido.

Foram analisadas três tipos de terra e dois tipos de agregados, dos quais se produziram blocos experimentais de modo a conferir a sua compatibilidade com o processo de produção. Uma vez selecionado um solo adequado para a produção dos BTC, optou-se pela formulação de duas composições estabilizadas e uma composição não estabilizada, de modo a demonstrar a vantagem da estabilização dos blocos. Para além da utilização do mesmo solo, manteve-se constante a proporção total de materiais cimentícios nas composições estabilizadas, de maneira a efetuar uma comparação entre as suas propriedades caracterizadas.

A caracterização dos blocos no estado fresco serve apenas como controlo de qualidade da fase de produção. No estado endurecido, caracterizam-se as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos blocos. De modo a caracterizar as propriedades mecânicas dos BTC recorre-se aos ensaios; de resistência à compressão, de resistência à flexão, e de resistência à tração por compressão diametral. As propriedades físicas caracterizadas são: a massa volúmica; a condutibilidade térmica; a velocidade de propagação de ultrassons; a permeabilidade. No que se refere às propriedades de durabilidade dos BTC, caracteriza-se o seu mecanismo de deterioração por ação da água, especificamente; a absorção e absorção capilar de água, e a resistência á erosão por gotejamento e erosão acelerada (spray test).

3.2. Materiais constituintes

Em seguida resumem-se os principais materiais utilizados na produção dos BTC.

- Tipos de terra; Terra “clara” (TA), Terra “escura” (TE) e Terra “neutra” (TN): As terras provêm todas da Herdade da Adua na localidade de Montemor-o-Novo. Em 3.2.1 apresenta-se uma caracterização detalhada destes materiais.
- Agregado reciclado (R): Resíduo da demolição de várias obras na localidade de Montemor-o-Novo proveniente da Unidade de reciclagem da Câmara Municipal de Montemor-o-Novo. É o resíduo final das várias etapas de britagem da Unidade, tendo, no geral, partículas finas de

diâmetro inferior a 2 mm. É essencialmente composto por betão, tijolo cerâmico e argamassas cimentícias.

- Areia fina (Af): Tem uma granulometria pouco extensa, em que todas as partículas apresentam diâmetros inferiores a 1 mm, e 80% das quais apresentam diâmetros inferiores a 0,5 mm.
- Cimento: Cimento tipo I 42,5 R, fornecido pela SECIL
- Cal: Cal hidratada EN 459-1 CL 80-S, fabricado por Calcidrata
- Água: Potável, extraída de um furo no local de produção dos BTC.

3.2.1. Caracterização dos materiais constituintes

No presente subcapítulo apresenta-se a caracterização geral dos agregados utilizados na produção dos BTC. O cimento e a cal não foram caracterizados, tendo-se como caracterização apenas os dados fornecidos pelos fabricantes. Na Tabela 14 resumem-se os ensaios de caracterização realizados para os agregados utilizados na produção dos BTC.

Tabela 14 - Ensaio de caracterização realizados e os respetivos documentos normativos consultados.

Ensaio	Documento normativo consultado
Análise granulométrica por peneiração húmida	LNEC E-293 (1970)
Determinação dos limites de consistência	NP-143 (1969)
Determinação da massa volúmica das partículas	NP-83 (1965)
Ensaio de compactação	D698 (2000)
Determinação da fração de matéria orgânica	Ensaio expedito não normalizado

3.2.1.1. Análise granulométrica por peneiração húmida

3.2.1.1.1. Objetivo e equipamento utilizado.

O objetivo deste ensaio é identificar as diferentes dimensões de partículas que compõem o solo e a sua distribuição no mesmo. As diferentes dimensões são expressas em percentagem relativamente à massa total da amostra. Neste ensaio só se identificam partículas com uma dimensão superior a 0,075 mm não se efetuando qualquer identificação mineralógica.

Utilizou-se a norma LNEC E-293 (1970), com peneiração húmida, para que os elementos argilosos se desagregassem, não se confundindo com as partículas de maior dimensão. Foi utilizada a serie de peneiros referido na norma.

3.2.1.1.2. Procedimento e cálculo dos resultados

Após secagem em estufa ventilada a 100°C, peneirou-se uma dada amostra de solo por um conjunto de peneiros normalizados, por ordem decrescente de dimensão. Posteriormente, o material retido no peneiro de 2,00 mm (nº10) e os de dimensão superior foi pesado (cada peneiro). A fração que passou no peneiro de 2,00 mm foi lavada por jato de água no peneiro de malha 0,075 mm

(nº200), e depois seca em estufa ventilada a 100°C. Finalmente, procedeu-se à peneiração, utilizando os restantes peneiros. A peneiração foi efetuada manualmente, seguindo o processo descrito na norma. Ilustram-se alguns dos passos do processo na Figura 20.



Figura 20 - Equipamento utilizado para a análise granulométrica: a) Serie de peneiros utilizados. b) Amostras após lavagem pelo peneiro #200. c) Exemplo de peneiração.

O resultado é apresentado através da curva granulométrica, traduzido pela percentagem de massa retida acumulada, em cada peneiro (em relação à massa total da amostra) em função da dimensão da abertura da malha do peneiro. Na Figura 26 (3.2.2) resumem-se as curvas granulométricas para cada uma das terras ensaiadas

3.2.1.2. Determinação dos limites de consistência

3.2.1.2.1. Objetivo e equipamento utilizado

A determinação dos limites de consistência de um solo é fundamental para a adequada seleção do solo a utilizar e, conseqüentemente, para a qualidade final dos BTC. Este ensaio tem como objetivo a identificação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) do solo, bem como o cálculo do seu índice de plasticidade (IP).

Para a determinação dos limites de consistência do solo seguiu-se a norma portuguesa NP – 143 (1969), considerando o equipamento apresentado na Figura 21.



Figura 21 - Equipamento utilizado para a determinação dos limites de consistência.

3.2.1.2.2. Procedimento e cálculo dos resultados

Seguiu-se o procedimento descrito na norma portuguesa NP – 143 (1969), tendo-se apenas utilizado a fração do solo passada no peneiro de 4,75 mm de abertura (nº4), que foi de seguida moída

com mão de borracha num almofariz cerâmico. Na Figura 22 apresentam-se fases distintas do ensaio.

O LL foi determinado com o auxílio da concha de Casagrande, em que uma amostra de solo foi parcialmente espalhada de modo a preencher cerca de 2/3 do volume da concha, procedendo-se em seguida à realização de um sulco com largura de 2 mm através do riscador. Finalmente, contabilizou-se o número de golpes necessários para que as duas faces do solo, separadas pelo sulco, voltassem a unir-se, num comprimento de cerca de 1 cm. Uma vez unido o solo, uma amostra foi retirada, seca em estufa ventilada a 100°C durante 24 horas e pesada, determinando-se assim, o seu teor em água. Este processo foi repetido quatro vezes para diferentes teores em água do solo, determinando-se a curva de evolução do solo em função do seu teor em água. Esta curva é traduzida pelo teor em água em função do número de golpes indicado em escala logarítmica. O LL corresponde ao teor em água referente a 25 golpes, podendo ser diretamente tirado do gráfico.

O LP foi determinado pelo método do rolo, em que foram produzidos quatro rolos finos de uma amostra de solo húmido. Basicamente, procede-se à produção, por rolamento sobre uma placa de vidro, de cilindros que apenas se partem com um diâmetro de cerca de 3mm. Uma vez atingido o diâmetro pretendido, os rolos foram secos em estufa ventilada a 100°C durante 24h e pesados, determinando-se assim o teor em água respetivo. A determinação do LP é dada pela média entre os teores de água dos quatro rolos produzidos e ensaiados.



Figura 22 - Ensaio de determinação dos limites de consistência.

Finalmente, o IP pode ser obtido pela subtração entre o LL e o LP. No Anexo II apresentam-se os resultados sobre a forma gráfica

3.2.1.3. Determinação da massa volúmica das partículas

3.2.1.3.1. Objetivo

Para uma caracterização mais aprofundada do solo a utilizar na produção dos BTC, recorreu-se ao ensaio de determinação da massa volúmica de partículas de um solo, de acordo com a norma portuguesa NP 83 (1965).

3.2.1.3.2. Procedimento

Utilizou-se uma amostra de solo, previamente seca em estufa ventilada a 100°C, e registou-se a sua massa numa balança com precisão de 0,01 g. Para o cálculo do volume recorreu-se ao método do picnómetro, registando-se a massa do picnómetro preenchido apenas com água e a massa do picnómetro com a amostra de terra e preenchido com água. De modo a retirar o ar presente no interior do picnómetro, a mistura foi previamente fervida, agitada durante cerca de um minuto, deixada 24 horas em repouso e, por fim, foi reposta a água com o auxílio de uma seringa. Na Figura 23 é possível ver-se o material utilizado e o aquecimento de um dos picnómetros (até à fervura).



Figura 23 - Ensaio de determinação da massa volúmica das partículas.

3.2.1.3.3. Obtenção de resultados

A massa volúmica seca das partículas (ρ_s) é dada pela relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas, conforme a Expressão 1.

$$\rho_s = K \times \frac{m_2 \times 1000}{(m_1 - (m_3 - m_2))} [Kg/m^3] \quad (1)$$

Em que,

- K: Quociente entre a massa volúmica da água à temperatura T e a 20°C (tabelado);
- m_1 : Massa do picnómetro cheio de água à temperatura T (g);
- m_2 : Massa do solo seco (g);
- m_3 : Massa do picnómetro com solo e água (g).

3.2.1.4. Ensaio de compactação (Proctor modificado)

3.2.1.4.1. Objetivo

O objetivo do ensaio Proctor (ensaio de compactação) consiste na determinação do teor ótimo de água (TOA). O TOA corresponde ao teor em água de um solo que permite, ao mesmo, atingir a sua massa volúmica seca máxima para uma dada energia de compactação. Teoricamente, a determinação do TOA permite identificar o teor em água a utilizar na produção dos BTC de modo a garantir a sua máxima compacidade (Bahar et al., 2004; Galíndez, 2009; K. M. a Hossain et al., 2007; Namango, 2006; Waziri et al., 2013).

Utilizou-se neste ensaio, a Norma D698 (2000), tendo se em consideração o modo de compactação leve em molde pequeno. Optou-se por este modo por apresentar pressões de compactação mais próximas à pressão de compactação exercida pelas prensas utilizadas na produção de BTCs (Bahar et al., 2004; Galíndez, 2009; K. M. a Hossain et al., 2007; Namango, 2006; Waziri et al., 2013).

3.2.1.4.1. Procedimento e obtenção dos resultados

Em resumo; uma amostra de solo com cerca de 12,5 Kg, previamente passada no peneiro de diâmetro 4,75mm (número 4), foi dividida em cinco porções iguais com cerca de 2,5 Kg, denominadas no presente trabalho por “pontos de solo”. Em seguida, juntou-se uma determinada quantidade de água conhecida ao ponto de solo e compactou-se o mesmo no referido molde. A compactação foi feita em três camadas, através de 25 pancadas (em cada camada) com auxílio de um pilão (2,49 Kg com altura de queda de 30,5 cm), criando-se assim um provete de solo compactado. Registou-se a massa do molde compactado, e do interior do provete moldado, retirou-se e pesou-se uma amostra, que depois foi seca em estufa ventilada a 100°C e registada a sua massa seca. Este processo é repetido para cada ponto de solo, sendo que se aumenta a quantidade de água adicionada a cada ponto de solo. Na Figura 24 ilustram-se várias fases do ensaio.



Figura 24 - Várias fases do ensaio Proctor com diferentes amostras de terras.

O teor em água é determinado para cada ponto de solo ensaiado e apresentam-se os resultados graficamente através da curva de compactação que relaciona o teor em água com a massa volúmica seca do provete (Anexo III). O parâmetro λ_s corresponde ao valor da massa volúmica seca obtida para o teor ótimo em água (TOA).

3.2.1.5. Determinação da fração de matéria orgânica

A matéria orgânica presente no solo é prejudicial, não só para os processos de estabilização química, mas também porque com o passar do tempo esta irá se decompor no interior dos BTC, deixando os blocos mais porosos.

De modo a contabilizar a quantidade de matéria orgânica contida no solo, recorreu-se ao ensaio expedito ilustrado na Figura 25. Basicamente, o ensaio envolveu os seguintes passos:

- Pesou-se uma amostra inicial de solo seco em estufa a 100 +/-5°C (m_0);
- Adicionou-se água oxigenada (H_2O_2) até cobrir totalmente a amostra filtrada, deixando que este reagisse com a mesma;
- Secou-se a amostra submersa em água oxigenada em estufa ventilada a 100 +/- 5°C, registando-se a sua massa final (m_1).

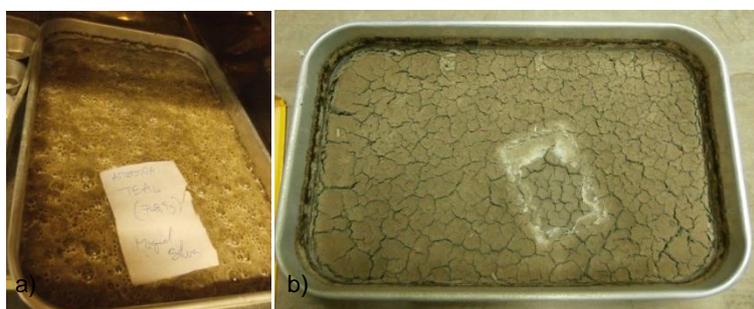


Figura 25 - a) Reação entre terra e H_2O_2 . b) Amostra de terra após secagem em estufa, sem matéria orgânica.

A porção da amostra que reage com a água oxigenada será a matéria orgânica. Portanto a fração de matéria orgânica (M_{org}), em percentagem relativamente à amostra inicial, é dada pela Expressão 2.

$$M_{org} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 [\%] \quad (2)$$

3.2.2. Apresentação e discussão de resultados

Na Tabela 15 resumem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados utilizados na produção dos BTC. Na Figura 26 apresenta-se as curvas granulométricas das terras analisadas. Os resultados são confrontados com os indicados na Tabela 3, tendo por base o exposto na literatura consultada. Os resultados do ensaio Proctor serão discutidos no Capítulo 4.

Todas as terras são areias argilosas, em que as frações de finos (argila/silte) são ligeiramente superiores aos sugeridos para a formulação de blocos estabilizados, e dentro dos sugeridos para blocos não estabilizados (Tabela 3). Como são as frações de argila/silte que estão acima dos limites desejados, optou-se pela correção granulométrica das terras usando areia fina (Af) ou agregado reciclado (R). É possível corrigir a fração de argila/silte de ambas as terras (TE e TN) com a

incorporação de 15%, tanto de areia fina como de agregado reciclado. Note-se que o valor apresentado para a fração de argila/silte do R, na verdade, não corresponde, nem a argila nem a silte, mas ao pó mais fino do resíduo de construção.

Em relação aos limites de consistência, considerou-se que as terras TE e TN estão dentro dos limites aceitáveis. No entanto, a TC foi excluída devido à sua elevada plasticidade. Apesar de a TN apresentar um limite de liquidez ligeiramente abaixo do sugerido, optou-se por não excluir a sua utilização, dado apresentar uma granulometria adequada.

A massa volúmica das partículas estão dentro dos valores usuais, que são, em geral, entre 2,6 a 2,7 para a terra, dependendo da tipologia da rocha mãe (Mehta et al., 2006).

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Material	Análise granulométrica			Limites de consistência			Proctor		Massa volúmica seca (Kg/m ³)	Matéria orgânica (% massa)
	Seixo (%)	Areia (%)	Argila/Silte (%)	LL	LP	IP	TOA (%)	λ_s (g/cm ³)		
TC	2	53.2	44.8	53	25	28	-	-	2550	1.70
TE	8.9	51.3	39.8	24	16	8	12.8	1.845	2672	9.23
TN	3.4	61.2	35.4	18	15	3	11.7	1.929	2665	1.87
R	14.9	67.6	17.5	-	-	-	-	-	2654	2.77

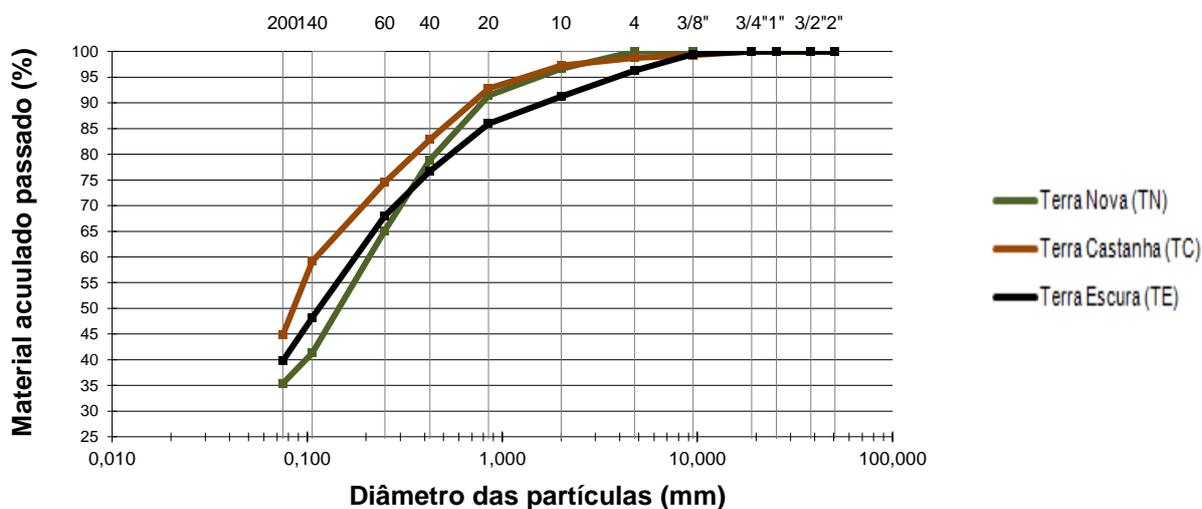


Figura 26 - Curvas granulométricas das terras analisadas

Apesar de não se ter estabelecido valores limites para a quantidade de matéria orgânica presente no solo, é de se realçar que a TE tem uma percentagem elevada que poderá trazer alguns problemas futuros nos BTC. No entanto, optou-se por não considerar este fator como o critério eliminatório da terra. O R não deveria apresentar uma percentagem tão elevada de matéria orgânica dado ser um resíduo de demolição de construção, pelo que se conclui que o mesmo deve ter sido contaminado no seu local de armazenamento.

3.3. Produção de misturas experimentais

3.3.1. Considerações gerais

De modo a garantir a compatibilidade com o processo de produção implementado no estaleiro de produção e otimizar a qualidade dos BTC, decidiu-se realizar várias misturas experimentais.

Sendo a terra a componente maioritária da composição dos blocos, ocupando 80 a 90% do seu volume, as misturas experimentais diferenciaram apenas no tipo de terra utilizada e no agente de estabilização física. Deste modo, as variações introduzidas correspondem às seguintes hipóteses: terra escura (TE) ou terra “neutra” (TN); areia fina (A) ou agregado reciclado (R), ambos como 15% da massa da terra. Na Tabela 16 resumem-se as misturas experimentais realizadas.

Tabela 16 - Misturas experimentais e a sua simbologia

Misturas experimentais				
Simbologia	Terra		Agregado	
	Tipo	(% em massa)	Tipo	(% em massa)
TN	Neutra	100	-	-
TE	Escura	100	-	-
TNA	Neutra	85	Areia fina (Af)	15
TEA	Escura	85	Areia fina (Af)	15
TNR	Neutra	85	Reciclado (R)	15
TER	Escura	85	Reciclado (R)	15

3.3.2. Critério de comparação

Como critério de comparação entre as várias misturas produzidas, definiram-se os parâmetros (qualitativos e quantitativos) indicados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros e escala de comparação entre as misturas experimentais.

Parâmetros de comparação	Escala de comparação
Dificuldade de pulverização	0 a +3
Dificuldade de moldagem	0 a +3
Dificuldade de transporte em fresco	0 a +3
Resistência à compressão aos 7 dias de idade	$f_{cm,7d}$ (MPa)

A escala de comparação apresentada na Tabela 17 funciona da seguinte forma; dificuldade reduzida (0); dificuldade razoável (+1); dificuldade significativa (+2); dificuldade elevada (+3). Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com o referido em 3.6.1.1.

3.3.3. Resumo de resultados

Os resultados da produção dos blocos experimentais encontram-se resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados da produção dos blocos experimentais.

Mistura	Pulverização	Moldagem	Transporte	Somatório qualitativo	Resistência média (MPa)
TN	0	+1	+1	+2	2.82
TE	+3	-	-	+3	-
TNA	0	+1	+3	+4	2.52
TEA	+3	0	0	+3	1.54
TNR	0	+1	0	+1	2.69
TER	+3	-	-	+3	-

As composições com terra escura (TE) foram abonadas (exceto o TEA, produzido apenas como termo de comparação), pois a terra escura necessitava de 4 a 5 passagens pelo pulverizador mecânico (Figura 14) de modo a obter-se a finura de terra desejada. As sucessivas passagens pelo pulverizador, não iriam apenas afetar negativamente o rendimento da produção dos BTC, como iriam também encarecer os blocos, deixando de ser sustentável a sua produção em massa (pulverizador elétrico). Apesar de não se efetuar um estudo económico dos BTC produzidos no presente trabalho, procurou-se sempre que possível optar pelas soluções mais sustentáveis.

A mistura TNA foi rejeitada devido à sua dificuldade de transporte em fresco (+3), dado que estes desintegravam-se durante o transporte. Concluiu-se que a incorporação da areia fina não era compatível com a terra “neutra”, pois tornava a mistura praticamente “não plástica”, reduzindo em demasia a sua coesão.

Em termos de resistência à compressão, todas as composições com terra “neutra” apresentaram valores próximos. Apesar da incorporação de agregado reciclado diminuir ligeiramente a resistência da terra “neutra” (TN), nos restantes parâmetros analisados, o desempenho da TNR foi superior. Deste modo, optou-se por considerar a TNR para a produção dos BTC.

Em suma, concluiu-se que a terra a ser utilizada seria a terra “neutra” e que, a esta, seria adicionada 15%, em massa, de agregado reciclado, cuja função principal é a correção da fração de argila/silte da terra.

3.4. Composições dos BTC

São vários os fatores que influenciam a qualidade dos blocos, tais como: o tipo e composição de terra; o tipo e proporção de estabilização; a quantidade de água na mistura; outros fatores provenientes da fase de produção, referidos no Capítulo 2.

Para as composições das misturas estudadas no presente trabalho, apenas diferenciou-se entre os ligantes utilizados como agente estabilizador e as proporções dos mesmos. Manteve-se constante o tipo de terra selecionado, e, dentro do possível, os restantes fatores que provêm diretamente da fase de produção. As proporções de ligantes escolhidas basearam-se na literatura consultada, sendo que as condições de produção em obra são sempre diferentes das condições laboratoriais controladas.

Tendo por base os resultados obtidos na campanha experimental, bem como os resultados relativos à caracterização dos materiais e limites de produção sugeridos na literatura (2.7), na Tabela 19 resumem-se as composições utilizadas no presente trabalho.

Tabela 19 - Composições utilizadas e respetiva simbologia.

Composições dos BTC (% em massa)						
Tipo	Simbologia da mistura	Terra neutra (%)	Agregado reciclado (%)	Cimento ^{a)} (%)	Cal ^{a)} (%)	Água ^{b)} (%)
Estabilizado	C	85	15	8	-	9.5
Estabilizado	M	85	15	4	4	10
Não estabilizado	N	85	15	-	-	9.6

a) % em massa da terra mais agregado reciclado

b) % em massa da terra mais agregado reciclado e estabilizador

Tendo por base os ensaios experimentais referidos em 3.3, optou-se por incorporar 15%, em massa, de agregado reciclado na terra “neutra”. À mistura de terra “neutra” com agregado reciclado, denominou-se de TNR. As percentagens de ligantes das composições referem-se à percentagem de massa seca da mistura TNR. A água utilizada foi apenas incorporada após a mistura a seco dos restantes materiais (3.5.2.2) pelo que a percentagem de água nas composições refere-se à percentagem de massa da mistura seca (TNR com, ou sem ligantes). A apresentação das composições em percentagens referentes à massa do solo, e à massa da mistura solo-estabilizadores (Tabela 19) segue a metodologia corrente para BTCs, como adotado por Exelbirt (2011), Kerali (2001), Krosnowski (2011), Namango (2006), Ngowi (1997), Walker (1995), entre outros.

Dado que se trata de um processo de produção não industrial, a quantificação do teor de água utilizado na mistura é realizada por processos expeditos, menos rigorosos. Neste caso a estimativa do teor em água utilizada na mistura teve em consideração o módulo expedito do ensaio “drop test” (3.6.1). No Anexo IV representam-se os teores de humidade calculados na produção dos BTC.

3.5. Produção dos BTC

3.5.1. Considerações iniciais

Conforme referido no Capítulo 2 do presente trabalho, o processo de produção dos BTC tem uma influência significativa na qualidade final dos BTC, sendo de tal modo significativo que é possível identificar, mesmo com os cuidados implementados, pequenas diferenças de qualidade entre diferentes lotes da mesma mistura produzidas no presente trabalho. Dada a sua relevância, no presente subcapítulo descreve-se detalhadamente o processo de produção, referindo-se os equipamentos e materiais respetivos, bem como as boas práticas e possíveis melhorias das mesmas. Em conjunto com a equipa da associação das Oficinas do Convento foram produzidos mais de 180 BTC, na localidade de Montemor-o-Novo, no Telheiro da encosta do Castelo de Montemor.

3.5.2. Processo de produção

3.5.2.1. Preparação da terra

Uma das grandes vantagens do uso dos BTC, passa por poder utilizar a terra no local de construção, o que no presente trabalho não ocorreu, dado que a terra era extraída num local a cerca de 5 Km do local de produção. Aproximadamente 2,5 m³ de terra com um teor de humidade reduzido, foi transportada por camião ao local de produção e em seguida espalhada, com o auxílio de enxadas, de modo a poder secar totalmente. Os maiores torrões foram desagregados manualmente com a utilização de maços metálicos com cerca de 12 Kg. Ao longo desta etapa demorosa foram removidas as pedras de maiores dimensões e toda a matéria orgânica visível.

Para se pulverizar a terra recorreu-se ao pulverizador de pás, mecânico, ilustrado na Figura 14. O pulverizador foi alimentado à pá, recolhendo-se a terra moída em carrinhos de mão com cerca de 8 litros de capacidade. Se a terra não se encontrasse devidamente seca antes de entrar no pulverizador corria-se o risco de entupir o mesmo, ficando a terra aderida às pás. Estimou-se que para se realizar 250 blocos, objetivo diário dos trabalhadores do telheiro, são necessários cerca de 20 carrinhos, e pulverizava-se esta quantidade em cerca de três horas. Assim, as etapas de produção até à mistura a seco dos materiais tinham um rendimento de 0,04 m³/h de solo pulverizado e peneirado.

A terra pulverizada foi peneirada por um peneiro com malha de 0,8 mm removendo-se todo o material indesejado (pedras, torrões que não foram desfeitos e alguma matéria orgânica grosseira). Foram necessários, pelo menos, três trabalhadores nesta etapa, ficando sempre dois a desagregar a terra e a alimentar o pulverizador e um a peneirar a terra já pulverizada.

3.5.2.2. Mistura dos materiais

Na produção das misturas utilizou-se uma betoneira de eixo basculante com capacidade de 60 litros (Figura 15). Foi necessário efetuar limpezas periódicas às pás da betoneira e realizar maiores tempos de mistura de modo a garantir maior homogeneidade. De facto, a rotação simultânea das pás e o funcionamento do tambor da betoneira não é o ideal conforme foi explicado em 2.4.3

Tendo-se em conta a experiência da equipa de produção, cada amassadura foi idealizada com 45 Kg de terra, efetuando-se a mistura a seco pela seguinte ordem; metade da terra, agregado reciclado, ligante (blocos estabilizados) e a restante metade da terra. Os materiais constituintes foram misturados a seco até que a mistura ficasse homogénea. A água necessária foi adicionada lentamente, por meio duma mangueira com uma ponteira dispersadora. A mistura húmida foi realizada até que a mistura ficasse homogénea e o teor de água estar próximo do teor ótimo de água, definido pela realização de sucessivos drop test. Este procedimento foi a melhor forma encontrada de garantir que a mistura apresentasse um teor de água próximo daquele que é o seu teor ótimo, estimado pelo ensaio de Proctor.

Brevemente, o drop test consiste em pegar numa mão cheia de mistura húmida e comprimi-la de modo a fazer um punho. Se esta não ficar coesa, então a mistura não está húmida que chegue e é necessário juntar mais água. Uma vez que ao se comprimir na mão, a terra não se desagrega, deve-se largar a bola de mistura, da altura da cintura, caindo sobre uma superfície rija e plana (Figura 27).

- Se a mistura se desagregar em muitos pedaços pequenos: considera-se que esta apresenta-se muito seca;
- Se a mistura se desagregar em 5 ou 6 pedaços: considera-se que esta apresenta um teor de água próximo do TOA;
- Se a mistura não se desagregar ou desagregar em 2 ou 3 pedaços grandes: considera-se que esta apresenta-se muito húmida.

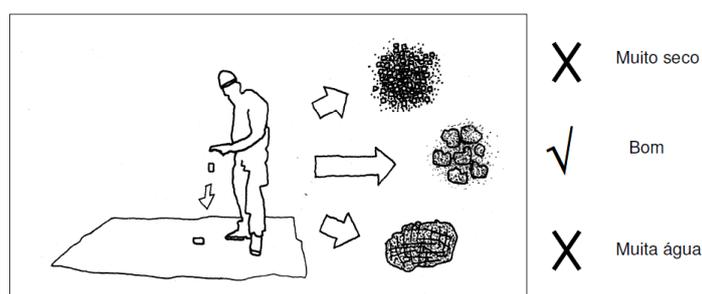


Figura 27 - Esquema ilustrativo do drop test (Hydraform, 2006)

No final, a mistura foi recolhida num carrinho de mão e transportada até à prensa. Retirou-se uma amostra de cada carrinho de mão, registando-se o seu peso, e posteriormente, o teor em água. Os teores em água das misturas encontravam-se abaixo do teor ótimo em água determinado previamente, mas de acordo com a prática comum na produção de BTC. Este facto não é problemático, conforme foi explicado em 2.2.4.



Figura 28 - Processo de recolha de amostra de mistura húmida para cálculo do teor de humidade de produção

3.5.2.3. Moldagem

Para a moldagem dos blocos utilizou-se uma prensa manual Terstaram da marca Appro Techno. Esta prensa é operada por duas pessoas em simultâneo e, segundo a ficha técnica da prensa, produz tensões de compactação de aproximadamente 3,6 MPa.

A moldagem do bloco é feita pelo movimento ascendente do prato inferior da prensa, prensando o material contra o prato superior que é previamente travado. No enchimento do molde, teve-se o cuidado de apertar os cantos do molde com os dedos e de preencher o espaço deixado. Este cuidado foi efetuado de modo a que, na desmoldagem do bloco, as arestas entre as faces laterais de moldagem não se danificassem. Estas regiões de aresta são problemáticas, dado serem as zonas de maior atrito na subida e descida do prato inferior. Ao longo da produção verificou-se que uma das faces laterais de moldagem de maior dimensão saía ligeiramente danificada, Figura 29 b). Este problema foi resolvido pelo aumento do braço da prensa, evitando a criação de atrito entre o bloco fresco e o desprendimento do prato superior da prensa.

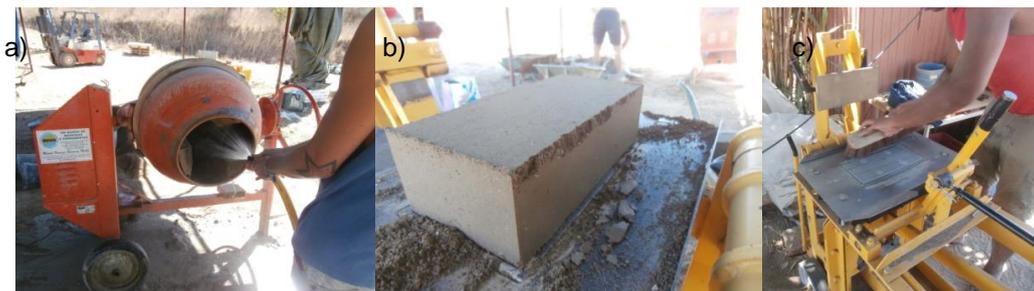


Figura 29 – Pormenores na moldagem dos BTC: a) Lavagem da betoneira. b) Pormenor dos danos resultantes da desmoldagem. c) Limpeza dos pratos da prensa.

Entre cada moldagem, os pratos da prensa eram limpos de modo a evitar a aderência de material aos mesmos e de modo a facilitar a remoção do bloco fresco da prensa, Figura 29 c). Os blocos frescos são depois removidos da prensa e transportados (manualmente) para paletes, onde ficam a curar. O transporte do bloco fresco tem que ser feito com cuidado especial, visto que nesta fase o bloco pode apresentar fraca coesão. Os blocos foram produzidos com reduzida variabilidade das dimensões. Apenas a espessura teve alguma variação entre os blocos. No entanto, estas variações foram geralmente inferiores a 1 mm, registando-se um número reduzido de casos em que a espessura variou 2 mm. As dimensões dos BTC produzidos são: 295 x 140 x 90 mm, em que as faces dos blocos serão designadas ao longo do presente trabalho, de acordo com a Figura 30.

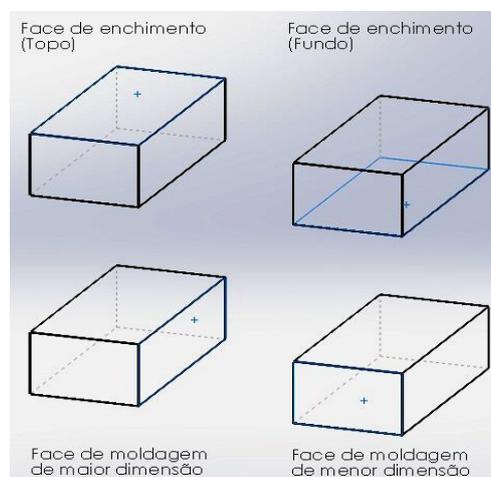


Figura 30 - Designação das faces dos blocos

3.5.2.4. Cura

A cura dos blocos foi realizado tendo em conta os seguintes cuidados:

- Garantir que a palete se encontrava nivelada (evitar flexão);
- Colocação dos blocos em filas e por camada, sendo que os blocos das camadas superiores devem assentar transversalmente em pelo menos outros dois blocos (Figura 31);
- Colocação de apenas 3 camadas de modo a não danificar os blocos das camadas inferiores;
- Espaçamento dos blocos com cerca de 5 cm, de modo a permitir a sua secagem e molhagem, no caso dos blocos curados com aspersão de água.



Figura 31 – Cura dos blocos a) Colocação dos blocos para cura. b) Pormenor de erro de colocação e demonstração da reduzida resistência à tração dos blocos frescos.

Foram realizados dois tipos de curas; cura a seco dos blocos não estabilizados; cura húmida dos blocos estabilizados. A cura a seco consiste na proteção dos blocos do ambiente exterior com lonas de plástico até aos 7 dias de idade. Para a cura seca, teve-se o cuidado de evitar que o ar circulasse por debaixo das paletes, prendendo o plástico por baixo do mesmo e colocando contrapesos á sua volta. Idealmente, as paletes deveriam ser protegidas do sol, mas tal não foi possível devido a condições logísticas no local.

A cura húmida consiste no humedecimento e proteção (com lonas de plástico) dos blocos até aos 7 dias de idade, como preconizado no betão. Para a cura húmida dos blocos estabilizados foram realizados os mesmos cuidados na colocação das lonas plásticas por cima das paletes. No entanto, as lonas foram removidas diariamente, de modo a se proceder à cura dos blocos por aspersão de água. Procedeu-se à aspersão de água até que todas as superfícies dos blocos se encontrassem totalmente humedecidas. A cura húmida foi feita por mangueira, nos primeiros dois dias com a ponta dispersadora e nos restantes dias sem ponta (endurecimento suficiente para não se danificarem).

Após os 7 dias iniciais de cura, os blocos foram transportados para o laboratório do Instituto Superior Técnico. Uma vez no laboratório parte dos blocos foram destapados e deixados a interagir com as condições variáveis de humidade e temperatura do laboratório e outra parte armazenada na camara húmida do laboratório. Os blocos condicionados no laboratório, estiveram sujeitos a temperaturas varáveis entre, cerca de 19°C e 26°C e humidade relativa de 55% a 75% e os blocos

condicionados na câmara húmida, sujeitos a temperaturas médias de 20°C e humidade relativa superior a 90%.

3.6. Caracterização dos BTC – Procedimentos de ensaio

Os BTC foram caracterizados no seu estado fresco através da sua massa volúmica fresca (3.6.4.), como forma de controlo de qualidade da fase de produção. A sua principal caracterização faz-se no seu estado endurecido, uma vez que é neste estado que é utilizada em condições de serviço.

A falta de normalização na área da construção em terra (2.5), especialmente em Portugal, levou à consideração de documentos normativos sugeridos em outros países. Dado a especificidade do tema, foi-se ainda confrontado com a falta de equipamento laboratorial (laboratório do Instituto Superior Técnico) para a realização dos ensaios, tendo sido necessário a adaptação de alguns equipamentos. Nos pontos seguintes descrevem-se, com detalhe, os ensaios realizados. Na Tabela 19 resumem-se os ensaios de caracterização dos BTC realizados no presente trabalho. Na Tabela 20 resume-se alguma informação referente aos condicionamentos dos provetes nos ensaios realizados de caracterização dos BTC. Na Tabela 21 resumem-se as condições de realização dos ensaios de caracterização dos BTC.

Tabela 19 – Ensaio de caracterização dos BTC realizados e respetivos documentos normativos consultados.

Ensaio	Documento normativo
Resistência à compressão	NBR 8492 (1984)
Resistência à tração por flexão	NP EN 772 – 6 (2002)
Resistência à tração por compressão diametral	NP EN 12390-6 (2011)
Massa volúmica	Ensaio expedito não normalizado
Velocidade de propagação de ultrassons	NP EN 12504-4 (2007)
Condutibilidade térmica	ISO/FDIS 10456 (2007)
Permeabilidade à água	Ensaio de acordo com Costa (1997) e Bogas (2011)
Absorção de água por imersão	Especificação LNEC E394 (1993)
Absorção de água por capilaridade	NTC 5324 (2004)
Erosão por gotejamento (drip test)	NZS 4298 (1998)
Erosão acelerada (spray test)	NZS 4298 (1998)

Tabela 20 - Informação sobre o condicionamento dos provetes nos ensaios realizados.

Humidade de ensaio	Simbologia	Características do condicionamento
Seco	Se	Provetes secos até massa constante
Saturado	St	Provetes submersos em água durante um período de tempo específico a cada ensaio
Laboratorial	Lb	Ambiente de laboratório: 19-26°C; humidade relativa 55-75%
Húmido	Hu	Câmara Húmida: 20°C; humidade relativa > 90%

No presente trabalho designam-se os provetes ensaiados como:

- Tipo A: Provede constituído por um bloco inteiro, de dimensões: 295 x 140 x 90 mm;
- Tipo B: Provede constituído por um meio bloco, cortado perpendicularmente à sua maior dimensão (serra rotativa), de dimensões aproximadas: 145 x 140 x 90 mm;
- Tipo C: Provede constituído por dois meios blocos (provede Tipo B) sobrepostos, de dimensões aproximadas: 145 x 140 x 180 mm.

Tabela 21 - Condições de realização dos ensaios de caracterização dos BTC.

Ensaio	Mistura	Provede	Nº Provede	Idade (dias)	Cura	Cond.*	Humidade (W) de ensaio
Compressão	N	Tipo C	3	7	A seco	Wcura**	Wcura**
	C, M				Húmida		
	N		4	28	A seco	Lb, Hu	Lb, Hu
	C, M		3				Se
			4		Lb, Hu		
3	Húmida	Se, St _{2 horas}					
	N		3	90	A seco	Lb	Lb
	C, M				Húmida		
Flexão	N	Tipo A	3	28	A seco	Lb	Lb
	C, M				Húmida		
Compressão diametral	N	Tipo A	3	28	A seco	Lb, Hu	Lb, Hu
	C, M				Húmida		
Massa volúmica	N	Tipo A	3	> 28	A seco	Lb, Hu	Lb, Hu, Se
	C, M				Húmida		Lb, Hu, Se, St _{48 horas}
Velocidade de propagação de ultrassons	N	Tipo A	3	> 28	A seco	Lb, Hu	Lb, Hu
	C, M				Húmida		Lb, Hu, St _{2 horas}
Condutibilidade térmica	N	Tipo B	3	28	A seco	Lb, Hu	Lb, Hu, Se
	C, M				Húmida		Lb, Hu, St
Permeabilidade	C, M	Tipo B	3	> 28	Húmida	Lb	St _{5 dias}
Absorção de água por imersão	N	Tipo A	3	> 28	A seco	Lb	Lb
	C, M				Húmida		
Absorção de água por capilaridade	N	Tipo A	3	> 28	A seco	Lb	Se
	C, M				Húmida		
Erosão por gotejamento	N	Tipo B	6	> 28	A seco	Lb	Lb
	C, M		3		Húmida		
Erosão acelerada	N	Tipo A	3	> 28	A seco	Lb	Lb
	C, M				Húmida		

*Cond.: condicionamento dos provetes, Lb,Hu,Se,St_i referido na Tabela 20. **Wcura: humidade dos blocos no fim da cura húmida (3.7.1.1.2).

Os blocos seccionados (provetes Tipo B e C), foram cortados com uma serra rotativa (Figura 32). Como existe uma perda de material durante o corte, de cerca de 3 a 4 mm, ocorre sempre uma ligeira diferença entre a dimensão de ambas as metades dos blocos. O teor de humidade “seco” (Tabela 20) é caracterizado por provetes secos ate massa constante. Considera-se alcançada a massa constante do provete quando a diferença entre massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, for inferiora 0,1% da média das duas leituras.

De modo a avaliar a durabilidade dos BTC, foram realizados ensaios de caracterização das suas propriedades de transporte, nomeadamente a permeabilidade, absorção capilar e absorção de água. Foram ainda realizados ensaios específicos para a análise de durabilidade dos BTC, que envolvem o ensaio por gotejamento (drip test) e o ensaio de erosão acelerada (spray test) (Tabela 19)

3.6.1. Determinação da resistência à compressão

3.6.1.1. Objetivo e equipamento utilizado

A resistência à compressão é considerada a propriedade de referência dos BTC, devido à sua influência e facilidade com que se relaciona com as restantes propriedades mecânicas do material (2.8.1.1.).

A resistência à compressão seguiu a metodologia da norma brasileira NBR 8492 (1984), efetuando-se algumas alterações à mesma. As alterações efetuadas têm por base o exposto na norma europeia EN772-1 (2002) (alvenaria cerâmica) e na norma técnica colombiana NTC 5324 (2004).

Para a realização do ensaio utilizaram-se uma prensa hidráulica de 4 colunas (Toni Pact) de capacidade até 3000kN e velocidade de carregamento regulável, acoplado à consola de comando Form + Test Seider CSRG5500, indicados na Figura 32. Devido à elevada capacidade da prensa foi necessário utilizar duas células de carga (dependendo da resistência esperada do provete) tipo F202 de capacidade até 100kN e 200kN, respetivamente. As células de carga foram ligadas a um data logger (Spider8, IBTM), tendo sido utilizado o software de aquisição de dados (Catman Express).

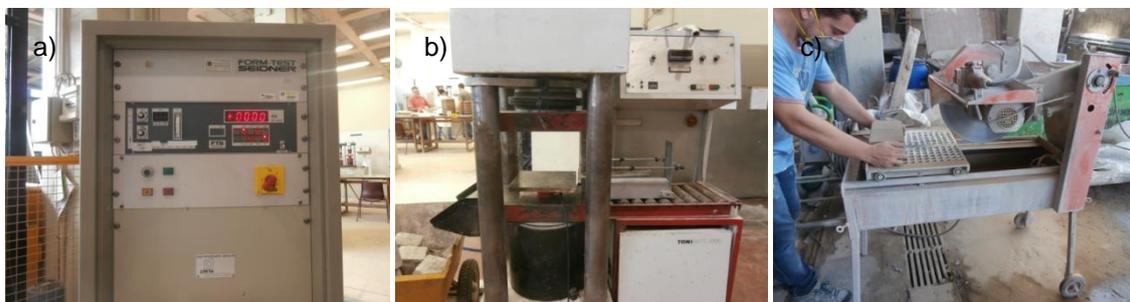


Figura 32 – Equipamento dos ensaios mecânicos: a) Consola de comando. b) Prensa Hidraulica com chapa de aço e celula de carga. c) Bloco a ser cortado com serra rotativa.

3.6.1.2. Provetes de ensaio

Os provetes são do Tipo C (3.7). Os dois meios blocos são sobrepostos sem a utilização de argamassa e com as superfícies cortadas invertidas (lados opostos). Optou-se por não utilizar argamassa entre as duas metades, ao contrário do sugerido na norma NBR 8492 (1984), dado que após várias experiências verificou-se que a ligação dos blocos com a argamassa sugerida na norma, não era o mais adequado (Figura 34). Nos provetes ligados com argamassa os valores de resistência foram consideravelmente mais baixos do que nos provetes sem argamassa, demonstrando o efeito negativo que a argamassa pode ter no provete. Conforme referido no Capítulo 2, Morel et al. (2007) sugerem que a utilização de argamassa entre os dois meios blocos tende a subestimar a resistência do bloco. Para além de subestimar a resistência do bloco, adiciona mais variáveis ao ensaio, como por exemplo a resistência e espessura da própria argamassa e a compatibilidade da argamassa com o bloco (Figura 34).

Os provetes são ensaiados aos 7, 28 e 90 dias de forma a analisar a evolução temporal da resistência à compressão dos BTC. De modo a analisar a variação da resistência com o teor em água dos blocos, os provetes foram ensaiados com humidades de ensaio diferentes, resultantes do seu condicionamento, conforme indicado na Tabela 20. Neste contexto, os provetes ensaiados aos 7 dias de idade apresentam um teor de humidade e tipo de condicionamento diferente dos restantes utilizados ao longo da campanha experimental. A humidade de ensaio dos provetes aos 7 dias de idade (W_{cura} , Tabela 21) corresponde ao teor de humidade dos blocos no fim do período de cura, em que a composição não estabilizada foi curada a seco e as composições estabilizadas curadas por aspersão de água (cura húmida).



Figura 33 - Condicionamento dos provetes: a) Seco (no forno). b) Húmido (Camara húmida). c) Saturado (água turva devido à desagregação dos provetes N)

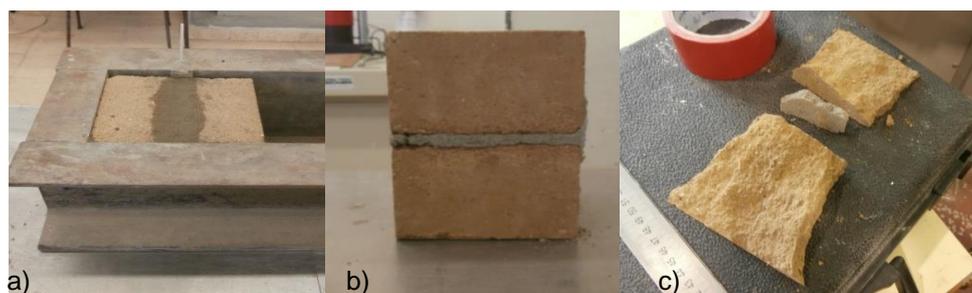


Figura 34 – Provetes rejeitados: a) e b) Provetes com argamassa. c) Pormenor de falta de compatibilidade entre argamassa e os meios blocos

3.6.1.3. Procedimento de ensaio

Os provetes foram colocados com a face de enchimento centrada sobre a célula de carga, com o auxílio de uma chapa de aço quadrada com 30 cm de lado e 4 cm de espessura, centrada no prato inferior da prensa, evitando assim a criação de excentricidades ao longo do ensaio. A chapa de aço não só serve como base de assentamento do provete, mas também, como forma de distribuir uniformemente a carga exercida entre o bloca e a célula de carga. Os provetes foram previamente pesados e foram registadas as suas dimensões. Utilizou-se uma velocidade de carga 0,5 kN/s, a que corresponde um aumento de tensão de aproximadamente 0,03 MPa/s. Os provetes foram ensaiados até à rotura, a que correspondeu o ponto de aumento de deformabilidade a força constante (Figura 35).



Figura 35 – Ensaio de compressão: a) Provete centrado pré-ensaio. b) Vista de lado de provete centrado pré-ensaio. c) Provete pós-ensaio.

3.6.1.4. Resultados do ensaio

O valor da resistência à compressão f_c é dado pela Expressão (3).

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Em que,

- F – carga máxima atingida (N);
- A – área do meio bloco de menor dimensão (mm²).

Na norma NBR 8492 (1984), a área utilizada no cálculo dos resultados corresponde à média das áreas dos meios blocos. No presente trabalho optou-se por seguir o recomendado na norma NP EN 772-1 (2002), ou seja, a área bruta do provete a que corresponde a área do meio bloco de menor dimensão. A resistência à compressão corresponde à média da resistência individual obtida em três provetes.

3.6.2. Resistência à tração por flexão

3.6.2.1. Objetivo e equipamento utilizado

O objetivo deste ensaio passa, não só pela avaliação da resistência à tração dos blocos, mas também pela análise da relação entre esta propriedade e a resistência à compressão dos mesmos.

Este ensaio realizou-se com base na norma NP EN 772 – 6 (2002). Visto que a norma foi prevista para BTC, e devido à especificidade do ensaio, foi necessário proceder a algumas alterações.

Neste ensaio utilizou-se a prensa hidráulica e restantes aparelhos auxiliares referidos no ponto 3.7.1.1.1. Para além destes equipamentos, idealizou-se o esquema, apresentado na Figura 36, que permite simular o ensaio de flexão em três pontos. Este esquema consistiu na colocação de dois apoios cilíndricos sobre a chapa de aço (3.7.1.1.3) e um terceiro apoio cilíndrico centrado no topo do provete (Figura 36). Os apoios cilíndricos consistem em varões de aço lisos com 15 mm de diâmetro (diâmetro mínimo permitido pela norma). Este esquema foi adotado devido à geometria dos blocos que impossibilitam respeitar a relação vão/espessura do provete apresentada na norma. Assim, fixou-se o vão em 25 cm e o referido engenho foi colocado sobre a célula de carga de 100 kN referido em 3.7.1.1.1.

3.6.2.2. Procedimento de ensaio

Para cada composição foram ensaiados 3 provetes do Tipo A (3.7) aos 28 dias de idade (Tabela 21). Os provetes foram condicionados em ambiente laboratorial de acordo com a Tabela 20. Segundo a norma NP EN 772 – 6 (2002) a temperatura de condicionamento dos provetes esteve dentro dos valores admitidos ($\geq 15^{\circ}\text{C}$) enquanto que a humidade relativa foi próxima do limite recomendado ($\leq 65^{\circ}\text{C}$).

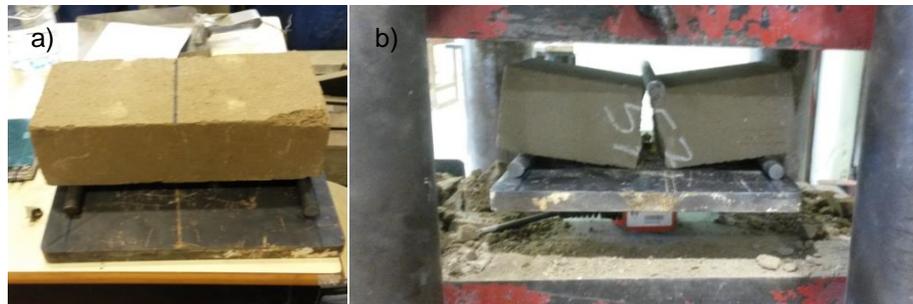


Figura 36 - a) Dispositivo de flexão com o provete centrado. b) Provete após ensaio de flexão.

Para cada provete, foi previamente efetuado a sua pesagem, medição e marcação do eixo central (perpendicularmente à sua maior dimensão). Uma vez centrados no dispositivo (conforme a Figura 36) os provetes foram ensaiados a uma velocidade constante de 0,1 kN/s (velocidade mínima permitida pela prensa), a que corresponde a um incremento de tensão de 0,02 MPa/s.

3.6.2.3. Resultados do ensaio

A resistência à flexão f_{tf} corresponde à média de resistências individual obtida em três provetes e foi determinada de acordo com a Expressão 4.

Na Expressão 4 tem-se que,

- F – carga máxima atingida pela prensa (N);
- l – vão entre os apoios cilíndricos de base, fixado em 250 mm;
- b – largura do provete (140 mm);
- h – espessura do provete (aproximadamente 90mm).

$$f_{tf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

3.6.3. Resistência à tração por compressão diametral

3.6.3.1. Objetivo e equipamento utilizado

Este ensaio visou complementar o ensaio de resistência à tração por flexão, referido em 3.7.1.2. O ensaio teve por base o disposto na norma NP EN 12390-6 (2011), idealizada para o ensaio de provetes de betão.

Para a realização deste ensaio recorreu-se mais uma vez à prensa hidráulica e os restantes equipamentos auxiliares referidos no ensaio de compressão (3.7.1.3.1). Para simular a compressão diametral, foi utilizado o engenho metálico apresentado na Figura 37, em que a carga é transmitida ao provete através de uma barra metálica assente sobre ripas de cartão prensado de dimensões 350 x 10 x 4 mm. Na figura 38 é indicada uma exemplificação da rotura dos provetes no ensaio.



Figura 37 – Esquema de ensaio de resistência à compressão diametral (vista frontal e lateral).



Figura 38 - Exemplificação da rotura dos provetes por compressão diametral.

3.6.3.2. Procedimento e provetes ensaiados

Os provetes são do Tipo A (3.7) e foram ensaiados aos 28 dias de idade. Para cada composição foram ensaiadas 3 blocos com duas humidades distintas: condicionados em ambiente laboratorial; condicionados na câmara húmida.

Os blocos foram previamente marcados de modo a garantir o seu alinhamento correto evitando a criação de excentricidades no decorrer do ensaio. O posicionador foi centrado diretamente sobre a célula de carga, que se encontrava também ela centrada com o prato inferior da prensa. Aplicou-se uma velocidade de carga constante de 0,1 kN/s (velocidade mínima permitida pela prensa).

3.6.3.3. Resultados de ensaio

A resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,sp}$) corresponde á média de resistências individual obtida em três provetes, e é indiretamente calculada tendo em conta a Expressão 5.

$$f_{c,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad [MPa] \quad (5)$$

Em que,

- F – carga máxima atingida (N);
- l – comprimento da linha de contacto do provete (295 mm);
- d – dimensão da secção transversal (mm).

3.6.4. Massa volúmica

A massa volúmica dos BTC foi estimada tanto no estado fresco como no endurecido. A massa volúmica fresca permite, indiretamente, caracterizar a compactidade dos BTC e serve de base para a previsão das suas propriedades no estado endurecido. A massa volúmica no estado endurecido pode-se relacionar indiretamente com as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, sendo assim um ensaio importante na caracterização dos BTC.

A massa volúmica dos blocos no estado fresco (Figura 39) foi determinada num bloco por amassadura (marcado como bloco de referencia), registando-se o seu peso numa balança com precisão à grama (Figura 39). A massa volúmica corresponde ao quociente entre a massa do bloco e o volume determinado com base na medição do comprimento das suas arestas (Expressão 6).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [Kg/m^3] \quad (6)$$

Em que,

- ρ - Massa volúmica (Kg/m^3)
- M – Massa do bloco de referência (Kg)
- V – Volume do bloco de referência (m^3)

O ensaio no estado endurecido realizou-se de forma semelhante ao referido para a determinação da massa volúmica no estado fresco, registando-se as massas dos blocos (com precisão até 0,1 g) e calculando-se o quociente entre esta e o volume do bloco, determinado com base na medição do comprimento das arestas.

O estudo da massa volúmica a diferentes idades, e sujeitas a diferentes condições de humidade e temperatura, permite de forma indireta avaliar o seu comportamento higrotérmico ao longo do tempo. A massa volúmica endurecida foi determinada nas seguintes condições:

- Seco até massa constante em estufa ventilada a 100°C;
- Saturado, após 48 horas de submersão em água;
- Condicionados em ambiente de laboratório.



Figura 39 - Pesagem de blocos de referência (frescos)

3.6.5. Ensaio de medição de velocidade de propagação de ultrassons

3.6.5.1. Objetivo e equipamento utilizado

O ensaio de ultrassons consiste na medição do tempo que um determinado impulso sonoro demora a percorrer um dado troço de um provete. Baseia-se na teoria de propagação de ondas, em que uma onda (impulso sonoro neste caso) se propaga mais rapidamente num meio denso e mais devagar num meio poroso. Este ensaio permite assim determinar indiretamente as características intrínsecas de um determinado provete.

Seguiu-se a norma NP EN 12504-4 (2007) na realização deste ensaio e recorreu-se ao método direto de medição com o equipamento Pundit lab+, da marca Proceq.

3.6.5.2. Provete ensaiados, procedimento de ensaio e cálculo de resultados

Os provetes utilizados foram do Tipo A (3.7), tendo sido ensaiados no dia em que se rececionaram no laboratório, e aos 28 dias de idade com humidades diferentes (Tabelas 20 e 21). Visto que a medição da velocidade de propagação de ultrassons é um ensaio não destrutivo, aos 28 dias, os provetes foram depois ensaiados à compressão.

Em primeiro lugar calibrou-se o equipamento com o auxílio do cilindro de calibração, cujo tempo de propagação é conhecido. De modo a garantir uma adequada medição do tempo de

propagação da onda, colocou-se no emissor e no recetor, vaselina sólida como produto de ligação ao provete. O emissor e o recetor foram colocados nas faces opostas da maior dimensão do bloco, conforme a Figura 40, e efetuaram-se duas medidas por bloco, trocando a posição dos transdutores.

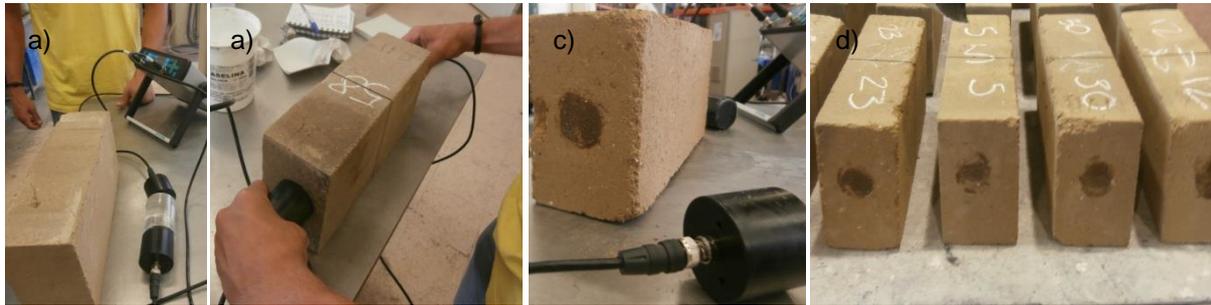


Figura 40 – Equipamento do ensaio de ultrassons: a) Calibragem do equipamento. b) Leitura de $V_{\mu s}$. c) e d) Pormenores dos blocos após o ensaio (antes de se efetuar o seu corte para ensaio à compressão)

A velocidade de propagação de ultrassons $V_{\mu s}$ é dada pela Expressão 7:

$$V_{\mu s} = \frac{L}{t} \quad [\text{mm}/\mu\text{s}] \quad (7)$$

Em que,

- L – distância entre o emissor e o recetor (mm);
- t – tempo de propagação de ultrassons (μs).

3.6.6. Condutibilidade térmica

3.6.6.1. Objetivo e equipamento utilizado

A terra, como material de construção, apresenta uma condutibilidade térmica relativamente baixa. Adicionalmente, devido às elevadas espessuras dos elementos de construção em terra, as mesmas apresentam elevadas inercias térmicas. Este ensaio tem como objetivo a quantificação do coeficiente de condutibilidade térmica (λ) dos BTC produzidos.

O equipamento utilizado para este ensaio foi o ISOMET 2114, da empresa Applied Precision Enterprise (Figura 41). Segundo a ficha técnica do aparelho, o coeficiente de condutibilidade térmica no intervalo de 0,015 a 0,70 W/m.K, pode ser obtido com um erro máximo de 5%, e no intervalo de 0,70 a 6,0 W/m.K com um erro máximo de 10%.

3.6.6.2. Procedimento e resultados de ensaio

Os provetes ensaiados são do Tipo B e foram ensaiados aos 28 dias, condicionados nas mesmas condições que os provetes utilizados no ensaio de resistência à compressão (3.7.1.1), conforme indicado na Tabela 21.

O ISOMET 2114 é um aparelho portátil que permite a leitura direta das propriedades de transferência de calor de um dado material, de preferência homogêneo. O equipamento recorre a um impulso térmico produzido pela sonda colocada diretamente sobre o provete. De modo a não introduzir variações de teores de humidade, os provetes foram revestidos por uma película plástica conforme observado na Figura 41 (exceto provetes condicionados no laboratório).

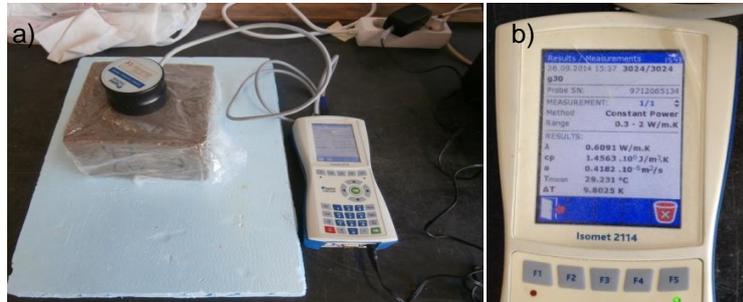


Figura 41 - a) Ensaio em bloco saturado. b) ISOMET 2114

Para comparar os valores obtidos de diferentes materiais é necessário converter os resultados para temperaturas de referência. Assim, de acordo com a norma ISO/FDIS 10456 (2007), a condutibilidade térmica (λ) pode ser convertida para uma temperatura padrão de 23°C através da Expressão 8.

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times e^{f_t(T_2 - T_1)} \quad [\text{W/m.}^\circ\text{C}] \quad (8)$$

Em que,

- λ_2 – Coeficiente de condutibilidade térmica em condições de temperatura padrão (W/m.°C);
- λ_1 – Coeficiente de condutibilidade térmica em condições de temperatura do ensaio (W/m.°C);
- f_t – Coeficiente de conversão de temperatura ($f_t = 0.001$, Tabela A.11 da ISO/FDIS 10456);
- T_2 – Temperatura padrão (23°C, ISO/FDIS 10456 (2007));
- T_1 – Temperatura do ensaio (°C).

3.6.7. Permeabilidade à água

3.6.7.1. Objetivo e equipamento utilizado

A permeabilidade à água é definida como a propriedade que caracteriza a resistência ao escoamento da mesma, quando um dado material é sujeito a um gradiente de pressão.

Não existindo uma norma específica para a permeabilidade à água em BTC, optou-se por seguir o procedimento adotado por Costa (1996) e Bogas (2011) em provetes de betão (Figura 42). O equipamento utilizado no ensaio consiste num depósito de ar abastecido por um compressor, que vai pressurizar água contida num reservatório a jusante que por sua vez é escoada até aos provetes. A pressão da água é controlada por uma válvula redutora de pressão, sendo aferida em dois

manómetros em locais diferentes do equipamento. Os provetes são apertados entre chapas metálicas e um conjunto de placas e anéis de borracha de modo a evitar eventuais fugas de água indesejáveis.



Figura 42 –Ensaio de permeabilidade a) e b) Equipamento de permeabilidade com alguns provetes colocados. c) Pormenor de colocação de um provete.

3.6.7.2. Provetes ensaiados

Para cada composição foram ensaiados 3 provetes do Tipo B. De modo a promover o escoamento unidirecional através do provete, procedeu-se à sua impermeabilização exceto em 2 regiões circulares de 3,5 cm de diâmetro na base e topo do provete (Figura 43). Para tal, aplicou-se sobre o provete seco uma tinta epoxídica de duas componentes. De modo a evitar fenómenos indesejados de absorção capilar de água no decorrer do ensaio, os provetes foram previamente saturados durante 5 dias.

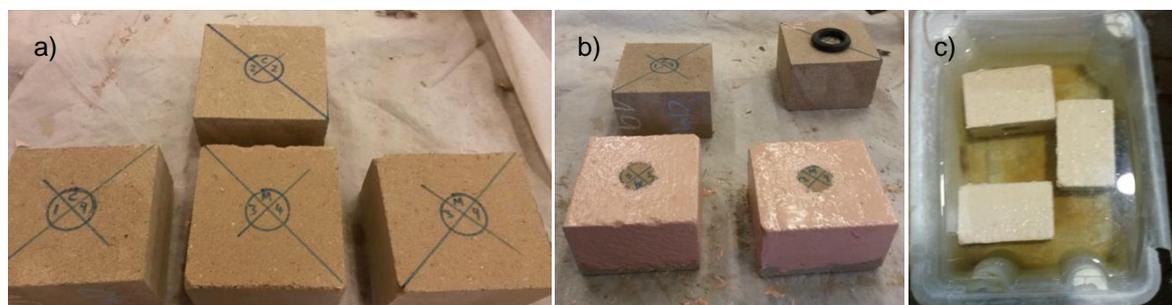


Figura 43 – Preparação, pintura e imersão em água dos provetes.

3.6.7.1. Procedimento e resultados de ensaio

O ensaio consiste em submeter os provetes a uma pressão de água constante de 0,1 MPa durante cerca de 5 minutos, após o fluxo através do provete estabilizar, a que corresponde a cerca de 3 minutos. A água que atravessa os provetes, durante o tempo de medição, é recolhida em recipientes de modo a determinar-se o coeficiente de permeabilidade (k_w), dado pela Expressão 9.

$$Q = \frac{k_w \times A \times \Delta P}{l} \quad [m^3/s] \quad (9)$$

Em que,

- Q = Caudal de água escoado (m^3/s);
- k_w = Coeficiente de permeabilidade à água (m/s);
- A = área de penetração da água (m^2) (área circular com raio de 3,5 cm);
- ΔP = Variação de pressão em altura de coluna de água (m) (0,1 MPa);
- l = espessura penetrada (m) (corresponde à altura do bloco, 90mm).

3.6.8. Absorção de água por imersão

3.6.8.1. Objetivo

A saturação total dos BTC é um cenário indesejável na sua aplicação em obra mas serve como indicador da porosidade aberta do bloco, que está indiretamente relacionada com a sua durabilidade a agentes exteriores. Este ensaio permite ainda aferir a capacidade do material resistir ao contacto direto com a água.

O ensaio seguiu a Especificação LNEC E394 (1993), consistindo basicamente na determinação da massa de água absorvida por um bloco durante um determinado período de tempo.

3.6.8.2. Procedimento

São ensaiados 3 provetes do Tipo A (3.7), por composição, que foram previamente conservados em ambiente de laboratório (Tabela 20). Antes de se submergir os provetes, registou-se as suas massas de modo a determinar a sua humidade inicial. Os provetes foram colocados sobre ripas para evitar o contacto total do provete com o tanque de imersão e posteriormente submersas em água a uma temperatura de $24^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ (Figura 44). Após 24 horas, os provetes foram removidos, limpando-se o excesso de água superficial com uma toalha, e registando-se a sua massa. Em seguida, os provetes foram de novo submersos mais 24 horas, repetindo-se o processo anterior. Após 48 horas, os provetes foram secos em estufa ventilada a $100^{\circ}C$ até se obter massa constante (3.7). Finalmente, registou-se o peso seco de cada bloco.



Figura 44 - a) Blocos C e M submersos. b) Blocos C e M a secar na estufa ventilada.

3.6.8.3. Resultados de ensaio

A absorção de água por imersão, num dado instante A_i , foi calculada de acordo com a Expressão 10. A absorção foi calculada em percentagem de peso.

$$A_i = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

Em que,

- M_s – Massa seca do provete (g);
- M_i – Massa húmida do provete no instante i (24 e 48 horas) (g).

Para cada composição, o valor final do coeficiente de absorção de água por imersão é dado pela média dos valores individuais correspondentes.

3.6.9. Absorção de água por capilaridade

3.6.9.1. Objetivo

A absorção capilar é provavelmente, a propriedade de transporte mais relevante, na medida em que, para condições normais de utilização, os provetes apresentam-se praticamente secos (Morel et al., 2007), tornando-se o mecanismo de penetração dominante. Basicamente, este ensaio mede a capacidade de absorção de água através dos vasos capilares existentes no interior dos blocos, fenómeno que acontece devido à diferença de pressão entre a superfície livre de água em contacto com o bloco e a superfície de água no interior dos vasos capilares.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma colombiana NTC 5324 (2004), especialmente concebida para BTC. Os tempos de pesagem foram ajustados, de modo a obterem-se coeficientes de absorção mais rigorosos.

3.6.9.2. Provetes ensaiados

Foram ensaiados 3 provetes do Tipo A (3.7) por composição, ensaiados após secagem em estufa ventilada a 70°C até massa constante. Após a realização de ensaios preliminares, definiu-se que, contrariamente ao sugerido na norma NTC 5324 (2004), os blocos seriam ensaiados assentes sobre a face de moldagem de maior dimensão (Figura 45) de modo a aumentar a altura de ascensão capilar (altura máxima possível de 140mm). A necessidade de obtenção de maior altura de bloco para a ascensão capilar resulta da alteração efetuada à norma em relação aos tempos de pesagem dos blocos.

3.6.9.3. Procedimento e resultados de ensaio

Os provetes, uma vez fora da estufa, foram colocados em ambiente laboratorial (embrulhados em plástico para evitar trocas de humidade) durante três horas para se estabilizar a sua temperatura

antes de se iniciar o ensaio. Uma vez estabilizado, registou-se a massa seca dos provetes (P_s). De seguida os provetes foram colocados sobre ripas no interior de um tabuleiro metálico. A face lateral do provete fica submersa, ficando a altura de água em contacto com o provete a 5 mm da mesma. Para cada determinado tempo de medição (t) o provete foi removido, retirado o excesso da água superficial com um pano húmido, e registado o seu (P_t). O provete foi de seguida recolocado dentro de água até ao próximo instante de medição, mantendo-se sempre o nível de água a 5 mm de altura do provete. Na Figura 45 apresenta-se, resumidamente, o procedimento.



Figura 45 - Procedimento do ensaio de absorção de água por capilaridade.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade C_b foi calculado de acordo com a Expressão 11.

$$C_b = \frac{100 * (P_t - P_s)}{s\sqrt{t}} [g/cm^2 min^{1/2}] \quad (11)$$

Em que,

- P_s – Massa seca do provete (g);
- P_t – Massa húmida do provete no instante de medição t (g);
- s – Área do provete em contacto com a água (calculado por $L \times h$ do provete) (cm^2);
- t – Instante de medição do provete (pesagem) (min)

Os provetes foram pesados após; 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 120 min, 360 min (6 horas), 24 horas e 72 horas de absorção. O valor final do coeficiente de absorção de água por capilaridade, em cada instante e por composição, é dado pela média dos valores individuais correspondentes.

3.6.10. Erosão por gotejamento (drip test)

3.6.10.1. Objetivo

O objetivo deste ensaio consiste em simular a queda da chuva sobre uma face do bloco, determinando-se assim a resistência superficial à erosão por água do bloco quando sujeito às condições climáticas do local (apenas ação da chuva). Trata-se de um ensaio qualitativo, classificando os blocos em relação à profundidade de erosão atingida devido ao gotejamento de água sobre a face do bloco. O ensaio realizado de acordo com a norma Nova-zelandesa NZS 4298 (1998).

3.6.10.2. Procedimento e resultados de ensaio

Basicamente, o ensaio consiste em promover a queda de 100 ml de gotas de água sobre um provete assente inclinado de modo a perfazer um ângulo de 27° (Figura 46). As gotas de água são largadas a 400ml de altura, durante um período de tempo compreendido entre 20 a 60 minutos. Uma vez terminado o gotejamento, regista-se a profundidade de erosão criada pelo gotejamento com uma vareta de madeira graduada (com 3,6 mm de diâmetro). De seguida o provete é seccionado no local de maior profundidade de erosão e mede-se a profundidade de penetração da água no interior do provete (Figura 46). Os ensaios foram realizados em 3 provetes do Tipo B (3.7) por composição, previamente armazenadas no ambiente de laboratório (Tabela 20). A face incidente da chuva foi a face de moldagem de menor dimensão, dado corresponder com a área de exposição do bloco em condições reais.

Conforme referido, este ensaio é qualitativo sendo que os blocos são classificados segundo os critérios definidos na Tabela 22, (profundidade de erosão). Considera-se que os provetes são adequados, quando a profundidade de penetração de humidade seja inferior a 120mm (se for superior serão rejeitados).

Tabela 22 - Classificação dos blocos de acordo com a profundidade de erosão (P.E.) – erosão por gotejamento.

Critério (mm)	Índice de erosão
*	1
0 ≤ P.E. <5	2
5 ≤ P.E. <10	3
10 ≤ P.E. <15	4
P.E. ≤ 15	5 (Rejeitado)

*apenas determinado por ensaio de erosão acelerada, NZS 4298 (1998)

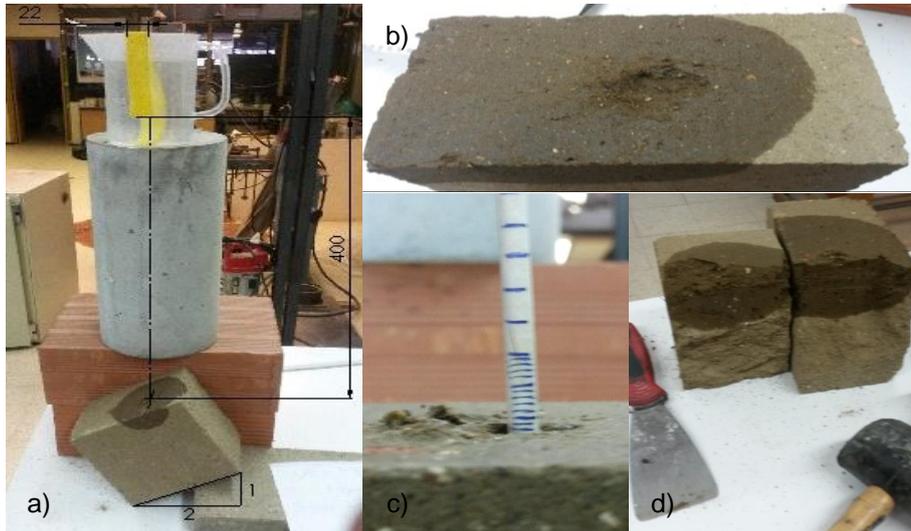


Figura 46 - Procedimento do ensaio de erosão por gotejamento: a) Esquema cotado. b) Provete erodido. c) Medição de profundidade de erosão. d) Medição de profundidade de penetração da água.

3.6.11. Erosão acelerada (spray test)

3.6.11.1. Objetivo e equipamento utilizados

À semelhança do ensaio de erosão por gotejamento, este ensaio procura determinar a resistência à erosão do bloco quando sujeito à ação de chuva. Neste ensaio simula-se a ação de chuva intensa, por meio de um jato de água a pressão constante (erosão acelerada).

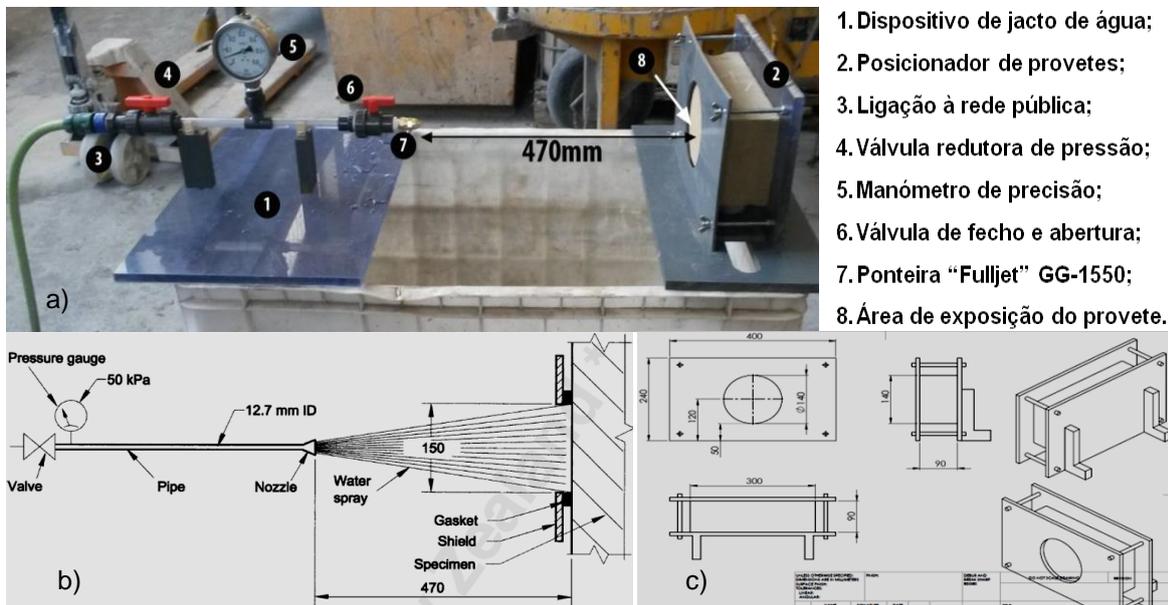


Figura 47 – Procedimento do ensaio de erosão acelerada: a) Equipamento de erosão acelerada. b) Especificação da Norma. c) Pormenorização do posicionador de provetes.

Para a realização deste ensaio seguiu-se a norma Nova-zelandesa NZS 4298 (1998). Foi necessário construir o equipamento apresentado na Figura 47, que foi realizado de acordo com o

especificado na norma. O equipamento é composto por duas partes independentes; o dispositivo de jato (Nº 1, Figura 47 (a)), e o posicionador do provete (Nº 2, Figura 47 (a)).

A pressão da rede de distribuição de água (cerca de 3 Bar, em Lisboa) foi reduzida para 0,5 bar por meio de uma válvula redutora de pressão, controlando-se a pressão num manómetro de elevada precisão. A ponteira utilizada, “fulljet” GG-1550 de ângulo estreito, foi selecionada segundo o proposto por Heathcote, (2002), visto ser a ponteira que melhor simula os efeitos de chuva intensa. A única alteração efetuada à norma, foi a utilização de uma área de exposição circular com um diâmetro menor do que os 150 mm especificados. O diâmetro foi reduzido para 140 mm, o que corresponde a largura dos provetes, evitando-se assim que existissem efeitos de erosão diferencial nas arestas dos provetes (zonas mais frágeis). A área de exposição é visível na Figura 47 c).

3.6.11.2. Provetes ensaiados e procedimento de ensaio

Para cada composição, foram ensaiados 3 provetes do Tipo A (3.7), armazenados em ambiente de laboratório (Tabela 20), que se fixaram no posicionador de modo a que uma das faces de moldagem ficasse centrada com o eixo do jato de água. Os centros dos provetes foram marcados antes da sua colocação no posicionador. Na Figura 48 resumem-se alguns passos do procedimento.

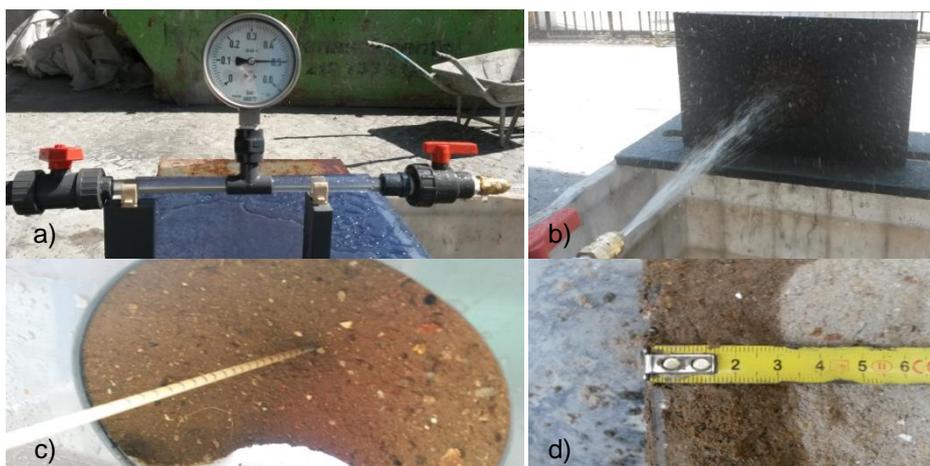


Figura 48 - a) Dispositivo de jato de água a pressão de 0,5 Bar. b) Impacto do jato de água no provete. c) Medição da profundidade de erosão do provete. d) Medição da profundidade de penetração de humidade.

A área livre de exposição do provete é sujeita ao impacto por jato de água durante 60 minutos ou até que o bloco seja totalmente erodido. O ensaio é interrompido em intervalos de 15 min e é registada a profundidade de erosão do provete. Uma vez concluído o tempo de ensaio, procede-se à medição da profundidade de penetração da água à semelhança do ensaio de erosão por gotejamento.

3.6.11.3. Resultados de ensaio

Do ensaio determina-se a uma taxa de erosão por hora, resultante da medição da profundidade de erosão. A profundidade de erosão é medida com a vareta apresentada no ensaio de

erosão por gotejamento. Quando o provete é totalmente erodido antes de terminar o tempo de ensaio, a taxa de erosão resulta da razão entre a espessura do provete e o tempo que demorou a sua erosão. À semelhança do ensaio de erosão por gotejamento, os provetes são classificados segundo a sua taxa de erosão, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Classificação dos blocos segundo a profundidade de erosão (P.E.) – erosão acelerada.

Critério (mm/h)	Índice de erosão
$0 \leq \text{P.E.} < 20$	1
$20 \leq \text{P.E.} < 50$	2
$50 \leq \text{P.E.} < 90$	3
$90 \leq \text{P.E.} < 120$	4
$\text{P.E.} \geq 120$	5 (Rejeitado)

4. Apresentação e discussão de resultados

No presente capítulo procede-se à caracterização no estado fresco e no estado endurecido dos blocos de terra compactados (BTC) produzidos de acordo com o referido no Capítulo 3. No estado fresco considerou-se o ensaio de massa volúmica, realizada principalmente como controlo de qualidade dos blocos durante a sua produção. Os ensaios no estado endurecido envolvem a realização de ensaios que visam a caracterização mecânica, física e de durabilidade dos BTC. Ao longo do capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na campanha experimental descrita no Capítulo 3, existindo o cuidado, sempre que possível, de ter em consideração o que foi referido no Capítulo 2, referente ao documentado na literatura consultada.

4.1. Considerações iniciais

Após a fase de produção, isto é, com os blocos no seu estado fresco, verificou-se que os mesmos foram produzidos de modo a possuírem a estabilidade dimensional e resistências mínimas compatíveis com o seu manuseamento e transporte. Os blocos da mistura não estabilizada, N, apesar de terem sido os mais fáceis de moldar, necessitaram de maiores cuidados no transporte, apresentando arestas mais friáveis que as composições estabilizadas. Entre as misturas estabilizadas C e M, com apenas cimento, e cimento e cal respetivamente, as diferenças foram pouco significativas, notando-se apenas que os blocos da mistura C apresentaram massa volúmica fresca superior aos restantes. Os blocos apresentaram um acabamento liso e uniforme, embora, os blocos da mistura N apresentassem uma superfície ligeiramente mais rugosa e friável do que as misturas estabilizadas.

Na Tabela 20 resume-se as condições de realização dos ensaios de caracterização dos BTC. Ao longo deste capítulo faz-se referencia a humidades de ensaio e condições de condicionamento dos provetes ensaiados, cuja informação está resumida Tabela 21.

Uma vez transportados para o laboratório do Instituto Superior Técnicos, após 7 dias de cura inicial (cura húmida para as misturas C e M), os blocos apresentavam-se íntegros, sem anomalias a registar. Optou-se por não rejeitar nenhum bloco, dado que a perda de material resultante dos danos sofridos no transporte, foi pouco significativa. Nenhum bloco se apresentava fissurado ou com fendilhação superficial. Apenas foi possível verificar alguns danos nas arestas e cantos dos blocos resultantes do transporte. No período em que os blocos estiveram armazenados no laboratório, não se registou qualquer deterioração adicional assinalável.

4.2. Massa volúmica fresca

Na Tabela 24 resumem-se os valores médios da massa volúmica fresca obtida imediatamente após a moldagem dos blocos, bem como o teor de humidade de produção de cada mistura, controlada por drop test. No Anexo VI apresentam-se todos os dados referentes ao cálculo das massas volúmicas de produção dos diversos blocos.

Tabela 24 – Resultados médios da massa volúmica fresca.

Mistura	Massa (Kg)	$\rho_{\text{Fresca}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	Teor de humidade de produção (%)
N	7.133	1918.9	9.6
C	7.446	2003.1	9.5
M	7.149	1929.2	10

Rigassi (1985) sugere um intervalo de valores recomendáveis para a massa volúmica no estado fresco (fase de produção) entre 1800 e 2200 Kg/m³. Segundo o apresentado na Tabela 24, as massas volúmicas médias frescas das misturas variam entre cerca de 1900 e 2000 Kg/m³, inserindo-se no intervalo indicado por Rigassi (1985). Desse modo, e tendo igualmente em consideração o valor esperado da massa volúmica teórica das composições, pode-se concluir que o processo de produção foi efetivo. As misturas estabilizadas com maior percentagem de cimento, apresentam valores de massa volúmica ligeiramente superiores.

Tendo em consideração a Tabela 24, o teor de humidade de produção dos blocos foi em média de cerca de 10%, encontrando-se ligeiramente abaixo do TOA determinado no ensaio Proctor (12%). No entanto, o valor obtido encontra-se no ramo seco da compactação, dentro dos valores médios sugeridos no Capítulo 2 (10 a 13%). O facto de se apresentarem no ramo seco da compactação, beneficia a resistência mecânica inicial (após desmoldagem) dos BTC (CRATerre et al., 1979; Rigassi, 1985). Segundo AVEI (2014), a utilização de teores mínimos de água, desde que aceitáveis, na prensagem dos blocos de BTC resultam em maior resistência mecânica, maior resistência à água, maior durabilidade e melhor comportamento térmico dos blocos. De referir ainda que é discutível a utilização do ensaio Proctor na determinação do TOA dos BTC. De facto, de acordo com Taallah et al. (2014), a pressão de compactação do ensaio Proctor não é compatível com a pressão estática exercida na produção dos BTC.

4.3. Porosidade total

Neste ponto procede-se à estimativa da porosidade total dos BTC. Considera-se como porosidade total (Pt); a relação entre o volume total de vazios (abertos e fechados) e o volume aparente do bloco.

O volume total de vazios ($V_{V_{\text{total}}}$) resulta do volume de vazios formado na produção dos blocos ($V_{V_{\text{produção}}}$) mais o volume de água que não é utilizada na hidratação do cimento ($V_{V_{\text{água}}}$), conforme a Expressão (12). O volume de vazios formado na produção estimou-se através da diferença entre o volume teórico, considerando que o bloco não possui vazios (através da proporção de cada material utilizado), e o volume aparente do bloco. Segundo Neville (1995) a quantidade de água (Massa de água: $M_{\text{água}}$) que não é utilizada na hidratação do cimento varia entre 18 a 23% da massa do cimento (M_{cimento}), dependendo do grau de hidratação do mesmo. No presente trabalho, considerou-se, através da Expressão (13), que a quantidade de água que não é utilizada na hidratação do cimento corresponde a cerca de 20% da massa do cimento.

$$Vv_{total} = Vv_{produção} + Vv_{água} [L] \quad (12)$$

$$Vv_{água} = \frac{(M_{água} - 0,2 \times M_{cimento})}{\rho_{água}} [L] \quad (13)$$

Encontram-se poucos estudos na bibliografia consultada referentes à porosidade dos BTC. No entanto, a porosidade relaciona-se com outras propriedades fundamentais, como a resistência e a durabilidade (Kerali, 2001; Neville, 1995). A porosidade, e consequentemente a permeabilidade, são influenciadas pela relação a/c e o grau de hidratação do cimento, nomeadamente, no que se refere às distribuição e dimensão dos poros. O cimento hidratado tem maiores dimensões que o cimento não hidratado pelo que os poros presentes no material diminuem com a hidratação do cimento. Quanto maior a relação a/c maior é a porosidade, e a permeabilidade do material, pois a água da mistura não utilizada na hidratação do cimento dá lugar a vazios após a sua evaporação (Mehta et al., 2006; Neville, 1995). Conforme mencionado no Capítulo 2, a pressão de compactação exercida na moldagem dos BTC, influencia a compacidade dos blocos, pelo que influencia também a sua porosidade e ainda a sua permeabilidade.

Na Tabela 25 apresentam-se as porosidades totais (Pt) estimadas para os BTC produzidos, e as porosidades determinadas por Kerali (2001) e Namango (2006), bem como a relação água/cimento (a/c) utilizada. No Anexo VI apresenta-se o cálculo mais detalhado das porosidades obtidas.

Tabela 25 – Porosidade dos BTC comparado com valores reportados por Namango (2006) e Kerali (2001).

	Composição	a/c	Pt (%)
Mistura C	8% Cimento	1.35	29.7
Mistura M	4% Cal + 4% Cimento	2.6	32.7
Mistura N	Não estabilizado	-	34.3
Namango (2006)	9% Cimento	2.06	36.7
	Não estabilizado	-	32.7
Kerali (2001)	9% Cimento	1.03	14.9
	5% Cal + 5% Cimento	1.87	25.8

Na Tabela 25 constata-se que a porosidade da composição N é semelhante à da composição não estabilizada de Namango, (2006). No entanto a composição C é inferior à da sua composição equiparável. A pressão de compactação utilizada por Namango, (2006) (2 a 4 MPa) é semelhante à utilizada na produção dos BTC, durante o presente trabalho (3,6 MPa), pelo que a diferença entre as porosidades resulta da maior relação de a/c utilizada por Namango, (2006). A porosidade da composição estabilizada por Namango, (2006), é maior que a da composição não estabilizada. O autor conclui que tal se deve à baixa massa volúmica que obteve para a composição estabilizada. Para além de uma pressão de compactação muito superior (6 MPa), as relações a/c utilizadas por Kerali, (2001) foram inferiores em ambas as composições equiparáveis, pelo que se justifica as porosidades apresentadas, sejam inferiores às porosidades das misturas produzidas. Conforme analisado em 4.2.1., os blocos de Kerali, (2001) apresentam maior resistência mecânica e maior

massa volúmica, pelo que até ao momento têm uma qualidade superior aos blocos produzidos no presente trabalho.

As porosidades apresentadas para os BTC produzidos referem-se aos blocos no estado endurecido. Estimou-se a porosidade dos BTC produzidos no seu estado fresco, ajustando a Expressão 13 de modo a considerar que ainda não se iniciou a hidratação do cimento, e assim diminui esta incerteza adicional. Confirmou-se que a porosidade dos BTC estabilizados diminui com a hidratação do cimento, pois as misturas C e M apresentaram porosidades, no estado fresco, de 32,4% e 34,0%, respetivamente. A porosidade da mistura N mantém-se inalterada no tempo.

A mistura C é menos porosa que a mistura M, devendo-se à menor relação a/c na sua produção. A cal tem uma área específica maior do que o cimento, pelo que, na produção dos BTC, de modo a manter a mesma plasticidade da mistura húmida, para a moldagem dos blocos, necessita de mais água do que o cimento (Osula, 1996). A quantidade de água utilizada nas duas misturas foi aproximadamente o mesmo (10%, determinado por sucessivos drop test), sendo que na mistura M foi ligeiramente superior do que na mistura C. A água adicional da mistura M não é consumida na hidratação do cimento, resultando assim num aumento da porosidade. A diferença entre as porosidades da mistura C e da mistura M é muito inferior à diferença obtida por Kerali, (2001) nas suas composições equiparáveis, apesar de, em ambos os casos existirem grandes diferenças na relação a/c. Assim, a porosidade dos BTC parece ser mais influenciada pela pressão de compactação durante a sua moldagem do que pela relação a/c utilizada. Tal é possível verificar, comparando a porosidade da mistura de cal e cimento de Kerali (2001) com a porosidade da mistura C, associada a menor a/c.

O aumento da massa volúmica dos blocos traduz-se numa diminuição da sua porosidade (Kerali, 2001; Namango, 2006), contudo, não é possível verificar tal fenómeno no presente trabalho, pois a massa volúmica está igualmente dependente da composição e do teor de humidade dos blocos. A massa volúmica das misturas M e N são muito semelhantes (ver 4.2.2), embora, a mistura M seja menos porosa do que a mistura N. Assume-se, que a mistura M é menos porosa devido à maior ocupação de vazios pelo cimento hidratado no seu interior, ainda que contenha apenas 4% de cimento, em massa do solo. Este fato é ainda mais relevante na mistura C, com 8% de cimento.

Em suma, tem-se que a estabilização dos BTC, sobretudo com cimento, é vantajosa na redução da sua porosidade, contudo, o fator primordial é a qualidade do processo de produção dos mesmos, nomeadamente a pressão de compactação durante a moldagem dos blocos. O ligante atua essencialmente com o objetivo de solidarizar os grãos entre si, tendo uma menor influencia na porosidade global dos BTC.

4.4. Massa volúmica no estado endurecido

Neste ponto apresenta-se a massa volúmica de cada mistura analisando-se a influência do teor de humidade e a relação que a mesma tem com a resistência à compressão dos BTC

produzidos. São ainda analisados os efeitos da pressão de compactação na moldagem dos blocos e a compatibilidade da pressão de compactação exercida no ensaio de compactação (Proctor).

Na Tabela 26 resumem-se as massas volúmicas médias das misturas produzidas. No Anexo VII apresentam-se todos os valores obtidos nos ensaios em maior detalhe. Na Figura 49 apresentam-se graficamente as diferentes massas volúmicas determinadas. Note-se que a Figura 49 inclui as massas volúmicas dos blocos no estado fresco (ρ_f), correspondente às massas volúmicas de produção (Tabela 26). Os blocos da mistura N desagregaram-se ao serem saturados, pelo que foi impossível medir a sua massa volúmica saturada.

Tabela 26 - Massa volúmica dos BTC no estado endurecido

Mistura	Humidade de ensaio	ρ (Kg/m ³)
C	Seco	1807.4
	Saturado	2001.7
	Laboratorial	1928.2
M	Seco	1745.2
	Saturado	1986.8
	Laboratorial	1809.1
N	Seco	1739.4
	Saturado	-
	Laboratorial	1801.8

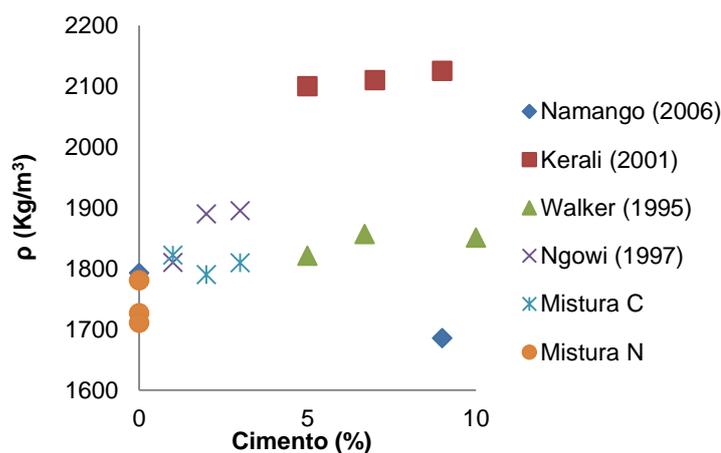


Figura 49 - Comparação das massas volúmicas secas com as reportadas por outros autores

Tendo-se produzido BTC com apenas um solo, e considerando que, na fase de produção dos blocos, manteve-se constante a quantidade de mistura colocada na prensa e a pressão de compactação, as diferenças entre as massas volúmicas provêm, essencialmente, das variações na composição das misturas e dos diferentes condicionamentos dos provetes (teor de humidade de ensaio).

No geral, as massas volúmicas obtidas variaram entre 1700 e 2000 Kg/m³, dependendo da composição e teor de humidade dos blocos. Estes valores estão dentro dos valores gerais documentados por Rigassi (1985) para a massa volúmica dos BTC. Comparando as massas volúmicas secas dos BTC com as massas volúmicas secas reportadas por outros autores (Figura 49 e Tabela 20), conclui-se que os blocos produzidos apresentam massas volúmicas secas ligeiramente abaixo do usual. Segundo Namango (2006), o limite inferior de aceitação da massa volúmica seca de um BTC na norma Queniana, é de 1800 Kg/m³, pelo que apenas a mistura C seria aceite. Contudo, os valores apresentados, por Ngowi (1997) e Walker (1995), para blocos com 8% de cimento, são apenas ligeiramente superiores, (cerca de 30 Kg/m³). Apenas Kerali (2001) apresenta valores muito superiores, cerca de 15% maiores, tanto para blocos com cimento (8%) como para blocos com cal e cimento (5% + 8%). Porém, o autor utilizou uma pressão de compactação de 6 MPa, permitindo um acréscimo da compacidade dos blocos. Evidentemente que a massa volúmica, ao depender do tipo e proporção dos constituintes da mistura, pode apresentar valores muito diferentes dos referidos em

outros trabalhos de investigação. A mistura N apresenta massa volúmica superior aos reportados na Tabela 20, exceto quando confrontado com o valor apresentado por Namango (2006). No entanto, Namango (2006), obteve massas volúmicas para composições estabilizadas com cimento, menores do que para a sua composição não estabilizadas, sendo que este fenómeno não se verifica em mais nenhum documento consultado. Em suma, os BTC produzidos apresentam massas volúmicas ligeiramente abaixo das observadas por outros autores, embora, as resistências mecânicas dos BTC estejam de volta de valores usuais (ver 4.2.3.1).

Os resultados do ensaio Proctor realizado às terras utilizadas no presente trabalho estão indicados na Tabela 15. No entanto, tendo-se optado por uma mistura de terra com o agregado reciclado, ensaiou-se também esta mistura como termo de comparação com as massas volúmicas dos blocos produzidos. O TOA do solo (TNR) utilizado é de 12,3% com uma massa volúmica seca de 1880 Kg/m³. A massa volúmica seca obtida pelo ensaio Proctor foi maior do que a massa volúmica seca de todas as composições dos blocos produzidos. A massa volúmica seca da composição não estabilizada foi de 1739,4 Kg/m³, sendo cerca de 8% inferior à obtida no ensaio Proctor. Estando as massas volúmicas dos blocos produzidos próximas dos valores usualmente observados para BTC, confirma-se que a pressão de compactação do ensaio Proctor não é compatível com a produção dos BTC, conforme mencionado por Taallah et al. (2014) (4.1.1).

Visto que a massa volúmica do cimento (cerca de 3100 Kg/m³), é superior às massas volúmicas dos restantes materiais constituintes dos blocos, a massa volúmica da mistura C é superior à das outras misturas, independentemente do teor de humidade. A massa volúmica da cal, da terra seleccionada e do agregado reciclado são, respetivamente; 2200, 2670 e 2655 Kg/m³ (valores aproximados). As misturas M e N apresentam massas volúmicas muito semelhantes, independentemente do teor de humidade. Segundo Adam et al. (1995), esta semelhança deve-se às diferenças entre as massas volúmicas dos materiais constituintes, em que, por um lado a do cimento é superior à do solo, e a da cal é inferior. Deste modo, na mistura M, que tem uma proporção igual de cimento e cal (4% cada), a diferença entre as massas volúmicas destes dois estabilizadores torna a massa volúmica da mistura M semelhante à da mistura não estabilizada, N. Se porventura se incorporasse apenas cal como estabilizador, os blocos tenderiam a apresentar uma massa volúmica mais baixa do que os blocos não estabilizados.

Conforme esperado, a massa volúmica aumentou com o aumento do teor de humidade (Figura 50). A mistura N apresentou maior massa volúmica no estado fresco, pois foi nesta fase que contem maior teor de humidade. Não se registando nenhum aumento dimensional dos blocos durante a sua saturação, o aumento da massa volúmica deve-se, unicamente, ao aumento da massa de água no bloco. Em termos médios verifica-se que devido ao teor de humidade a massa volúmica das misturas utilizadas pode aumentar em cerca de 11% a 13% do estado seco para o saturado, devendo-se ter em atenção esta variação no dimensionamento estrutural (Figura 50).

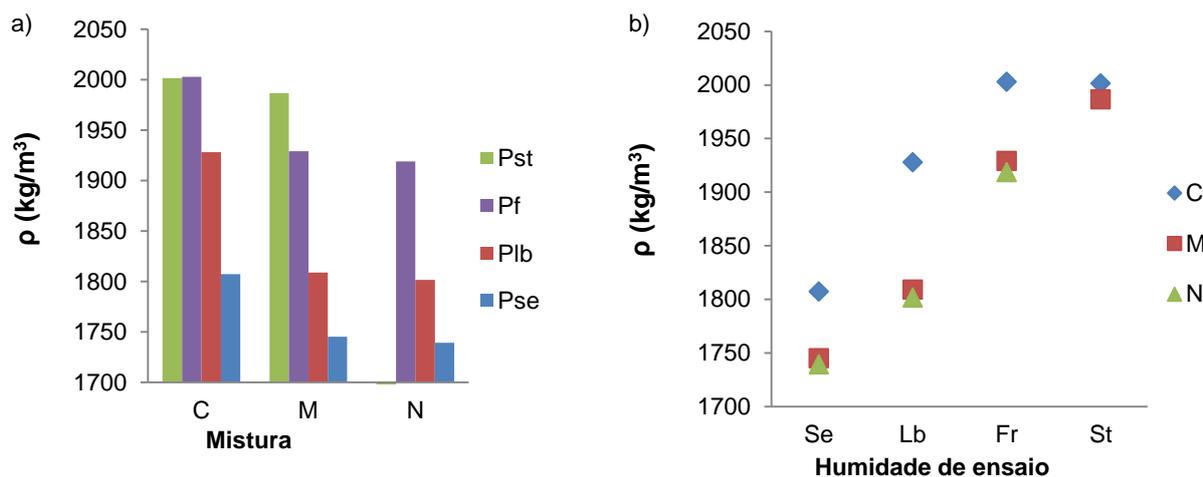


Figura 50 - Representação gráfica das massas volúmicas dos provetes ensaiados

4.5. Resistência mecânica

No presente ponto são caracterizadas as principais propriedades mecânicas dos BTC produzidos, nomeadamente a resistência à compressão e a resistência à tração, por flexão e por compressão diametral. Para cada uma destas propriedades, analisa-se a influência da composição e do teor de humidade dos blocos. Os valores obtidos de resistência à compressão e à tração são ainda confrontados com as resistências documentadas na literatura consultada. Os blocos são classificados em termos da resistência à compressão, segundo as normas NBR 8492 (1984) e NTC 5324 (2004). A relação entre a resistência e a durabilidade dos BTC é analisada em 4.2.6.6.

4.5.1. Resistência à compressão

Na Tabela 27 resumem-se os resultados médios do ensaio de resistência à compressão, sendo que esta informação está apresentada em maior detalhe no Anexo VIII Na Figura 52 apresenta-se a influência do teor da humidade na resistência à compressão aos 28 dias dos BTC. As humidades de ensaio resultam do processo de condicionamento dos provetes, resumido na Tabela 20, e que basicamente corresponde aos seguintes estados: seco; saturado; ambiente de laboratório; húmido.

Não se apresentam os valores de resistência à compressão aos 28 dias dos blocos N, no estado saturado, dado que os provetes se desagregaram ao serem submersos em água. A desagregação ocorrida nos BTC não estabilizados em contacto com a água está de acordo com o esperado e igualmente reportado na bibliografia consultada. Deste modo, a desagregação era, de certa forma, esperada, no entanto, a facilidade e, sobretudo, a rapidez (no instante de contacto com a água) com que todos os blocos da mistura se desagregaram, implicou que a análise da durabilidade dos BTC, neste trabalho, tivesse um foco superior ao que inicialmente foi programada.

Tabela 27 - Resultados médios do ensaio de resistência à compressão.

Mistura	Idade (dias)	Humidade de ensaio	f_c (MPa)
C	7	Cura conforme 3.5.2.4	2.70
		Seco	5.37
	28	Saturado	2.24
		Laboratorial	4.18
		Húmido	3.84
90	Laboratorial	5.55	
M	7	Cura conforme 3.5.2.4	1.69
		Seco	3.14
	28	Saturado	1.05
		Laboratorial	2.34
		Húmido	2.01
90	Laboratorial	2.91	
N	7	Cura conforme 3.5.2.4	0.84
		Seco	2.37
	28	Saturado	0.00
		Laboratorial	1.34
		Húmido	1.02
90	Laboratorial	1.77	

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, estão dentro dos valores reportados por outros autores (Figura 51, ver também Tabela 5). No trabalho de Walker (1995), a resistência à compressão de BTC estabilizados com cimento é citado por vários documentos consultados e utilizado normalmente como referência para a resistência à compressão dos BTC. Neste contexto, a mistura C tem uma resistência semelhante à obtida nas composições equiparáveis estudadas por Walker (1995), tanto no estado seco como saturado, por sua vez, Ngowi (1997) apresenta valores semelhantes aos obtidos nas composições estabilizadas, C e M, tendo produzido os seus blocos em condições similares às adotadas no presente trabalho (3.5). Contudo, Ngowi (1997) não especifica o teor de humidade dos provetes durante o ensaio pelo que se assume que o mesmo se refere a provetes no estado seco. Elenga (2011), Kerali (2001) e Krosnowski (2011) utilizam pressões de compactação, muito superiores (6 a 10 MPa) à pressão utilizada nos blocos produzidos (cerca de 3,6 MPa), pelo que, independentemente do teor de humidade dos provetes e da sua composição, a resistência dos seus blocos é superior. Conforme referido no Capítulo 2, está demonstrado que o aumento da pressão de compactação de um BTC, conduz a resistências mecânicas superiores (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Hossain et al., 2011; Inicia, 2012; Kerali, 2001; Rix, 1998; Riza et al., 2010; Walker, 1995). Riza et al. (2010) refere que o aumento de pressão de compactação de 5 MPa para 20 MPa resulta num aumento de cerca de 80% na resistência à compressão dos BTC. Namango (2006) obteve, para uma composição não estabilizada, resistências superiores (4,8 MPa) à da mistura N. No entanto, este autor utilizou blocos inteiros como provetes de ensaio, tendo-os ensaiado na direção perpendicular do leito dos blocos. Conforme referido em 2.8.1.1, a geometria do provete pode ter uma influência importante na resistência à compressão. Ainda assim, apesar dos valores elevados de resistência obtidos por Namango (2006) em blocos não

estabilizados, este autor não teve sucesso na estabilização do solo, dado que apresentou um solo mais coeso do que o solo utilizado no presente trabalho e obteve valores de resistência em blocos estabilizados com cimento próximos das resistências alcançadas pela mistura C. Namango (2006), ao contrário da restante literatura consultada, obteve ainda massas volúmicas menores na composição estabilizada do que na composição não estabilizada (4.2.1). Os valores da resistência à compressão apresentados por Bahar et al. (2004), referem-se a cilindros de terra e não BTC, pelo que, a sua comparação direta com BTC não pode ser estabelecida, até porque foram sujeitos a diferentes tipos de compactação (4.2.1.). As resistências obtidas por Bahar et al. (2004) são ligeiramente inferiores, independentemente da composição equiparável com as composições produzidas. Contudo, os provetes de Bahar et al. (2004) apresentam uma relação altura/base maior que os provetes ensaiados no presente trabalho.

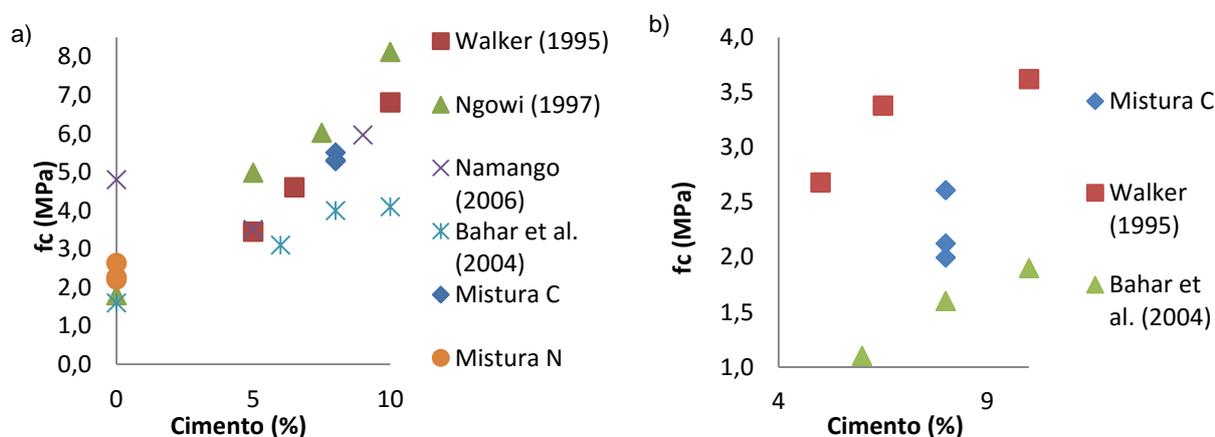


Figura 51 - Resistência à compressão (28 dias) reportado por outros autores: a) Estado seco b) Estado saturado

Segundo a norma NBR 8492 (1984), e considerando o procedimento de ensaio utilizado no presente trabalho (3.7.1.1.2), a mistura C é considerada aceitável, por apresentar uma resistência à compressão no estado saturado superior a 2 MPa. A norma é aplicável apenas para blocos estabilizados com cimento, pelo que não se classificam as misturas N e M. A norma NTC 5324 (2004), tem em conta apenas blocos estabilizados com cimento (Bloques de suelo cemento – BSC), classificados por um conjunto de parâmetros: resistência à compressão (por exemplo: resistência mínima de 2 MPa corresponde a BSC 20); meio de aplicação (P: blocos aplicados em paredes sem acabamento; O: blocos aplicados em paredes com acabamento protetor; H: blocos aplicáveis em meios húmidos; S blocos apenas aplicáveis em meios secos); dimensões dos blocos. Obtém-se as seguintes classificações:

Mistura C: BSC P 40 H, 14 x 9 x 29,5;

Mistura M: BSC P 20 H, 14 x 9 x 29,5;

Mistura N: BSC O 20 S, 14 x 9 x 29,5.

Na caracterização da resistência mecânica dos BTC, optou-se por atribuir maior importância aos resultados obtidos dos provetes ensaiados no estado seco ou provenientes do ambiente de humidade e temperatura variável de laboratório (ver Tabela 20). Conforme referido em 3.7.3.2.1, para condições normais de utilização, os BTC apresentam-se praticamente secos. De acordo com Morel et al. (2007), nas normas que regem a classificação de BTC, a resistência à compressão seca deveria ser o parâmetro utilizado para a sua classificação e não a resistência à compressão no estado saturado, como muitas vezes sucede.

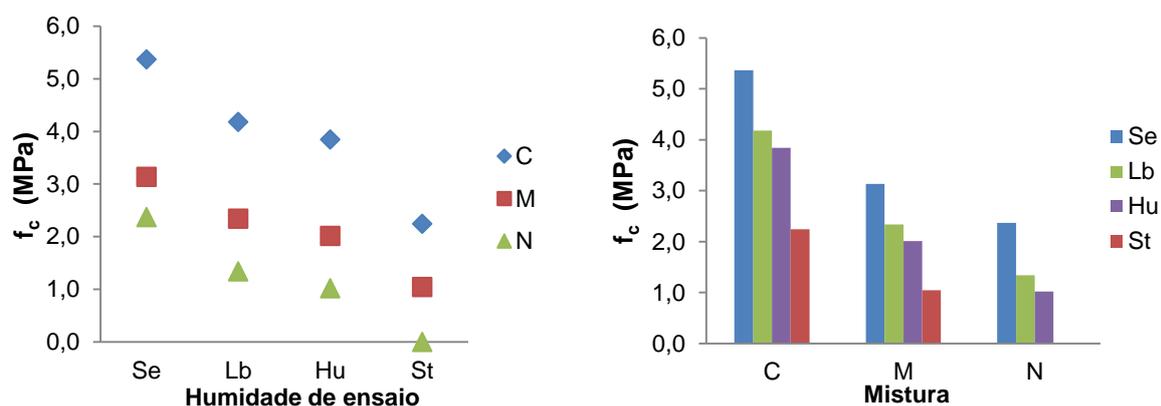


Figura 52 - Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes humidades de ensaio dos provetes.

Por análise da Figura 52, e conforme seria esperado, os blocos da mistura C têm a maior resistência à compressão do que as restantes misturas, independentemente do teor de humidade. O mesmo acontece comparando a mistura M com a mistura N. Tal resulta do tipo e proporção de estabilizador utilizado em cada mistura. O cimento permite o desenvolvimento de resistências mecânicas muito superiores à cal e ao fraco poder de coesão do solo argiloso. Considerando apenas como mais relevante a contribuição do cimento, a menor relação água/cimento (a/c) da mistura C face à mistura M traduz-se, num incremento natural da resistência à compressão. A influência da relação a/c , nomeadamente na porosidade dos BTC e na sua resistência mecânica, foi abordada em 4.2.1.

Conforme referido no Capítulo 3, os provetes ensaiados à compressão consistiram na sobreposição de dois meios blocos, assentes um sobre o outro, recorrendo-se a uma serra rotativa para efetuar o seu corte. Durante o corte dos provetes, verificou-se que os blocos apresentaram comportamentos distintos, oferecendo maior resistência ao corte as misturas C, seguida das misturas M. Como seria expetável, a resistência ao corte dos blocos variou de forma proporcional à sua resistência à compressão.

No que se refere às resistências à compressão no estado seco, os blocos C foram 42% mais resistentes que os blocos M, e 56% mais resistentes do que os blocos N. A diferença entre as misturas M e N foi menos significativa, sendo de apenas 24%. Ngowi (1997) reporta valores em que os BTC estabilizados com cimento são cerca de 70% mais resistentes que os BTC estabilizados com cal (provetes secos). Dado que a mistura M é composta por cal e cimento, é natural que estas misturas apresentem diferenças face às misturas C, inferiores aos referidos por Ngowi (1997). No que

se refere aos provetes conservado em laboratório, as diferenças de resistência, de acordo com a ordem referida anteriormente, foram de 44%, 68% e 43%, respetivamente. Em face dos resultados obtidos, constata-se que à medida que o teor de humidade aumenta, a diferença de resistência entre as diferentes misturas também aumenta. Tal resulta das misturas com ligante hidráulico serem menos prejudicadas com o aumento do teor em água. A resistência seca, da mistura N, resulta do poder de coesão da fração de silte/argila presente no solo, pelo que, podem existir grandes diferenças face a outras composições não estabilizadas. Com a inclusão de apenas mais 4% cimento (8% no total) a resistência à compressão foi muito superior independentemente do teor de humidade (maior como aumento da humidade de ensaio). Tal se deve ao facto de se verificar uma relação aproximadamente exponencial entre a resistência à compressão e a relação a/c (Powers, 1958). Como seria esperado, a cal não contribui de forma relevante para a resistência, nomeadamente em idades jovens em que as reações associadas ao seu endurecimento são pouco significativas.

Conforme referido, a eficácia da estabilização da mistura parece diminuir quando estas se encontram em situações extremas de secagem, o que raramente sucede em condições normais de serviço. Ainda assim, o incremento de resistência obtido nas misturas estabilizadas e sobretudo a capacidade de se manter estável, mesmo em situação extrema de contacto direto com a água, justifica a opção de se proceder à estabilização dos BTC. Em face ao aumento importante de resistência verificada entre as misturas com 4 e 8% de cimento e tendo em consideração apenas critérios de eficiência estrutural (resistência versus massa volúmica, ponto 4.2.3.1.2) pode justificar a opção de utilizar maiores dosagens de cimento na estabilização dos blocos. Em qualquer das misturas, a resistência mecânica foi sensível à variação do teor de humidade, dado que interfere nas características de coesão da fração de solo e no desenvolvimento da resistência da cal. De facto, conforme mencionado no Capítulo 2, o aumento do teor de humidade nos blocos resulta num abaixamento da resistência mecânica, devido à dissolução de aglomerados de partículas de solo (fração argila/silte) não estabilizadas (Walker, 1995). Tal confirma-se nos resultados dos ensaios de compressão, indicados na Figura 52. Importa ainda referir, que em misturas cimentícias correntes existe sempre um ganho ligeiro de resistência quando estes se apresentam secos (Bogas et al., 2014; Swamy et al., 1983).

Referiu-se anteriormente que os blocos da mistura N foram os mais prejudicados pelo aumento do teor de humidade, tanto que quando imersos em água estes se desagregaram completamente. Em relação ao estado seco, os blocos N apresentaram uma redução na resistência de 43% face aos blocos condicionados em ambiente de laboratório e 57% face aos blocos com teor de humidade de ensaio húmido. Por sua vez, a mistura C foi a menos afetada pela presença de humidade, existindo apenas uma redução de 22% na sua resistência à compressão com o aumento do teor de humidade entre o estado seco e os provetes condicionados em ambiente de laboratório. Ainda assim, a saturação dos blocos C, conduz a 58% de redução face ao estado seco. Finalmente, os blocos da mistura M sofreram uma redução de 67% face aos blocos secos. É também possível concluir que, à medida que o teor de humidade aumenta, aumenta a redução da resistência à compressão, isto é, aumenta a diferença entre a resistência à compressão seca e a resistência à

compressão com maior teor de humidade. Por exemplo, analisando a mistura C, a resistência à compressão seca diminui 22% para provetes com humidade de ensaio laboratorial (55-75%HR), diminui 28% para provetes húmidos (> 90% HR) e 58% em estado saturado (100%HR).

A resistência à compressão evolui de uma forma oposta à porosidade (Kerali, 2001; Mehta et al., 2006; Neville, 1995). No presente trabalho não é possível estudar diretamente a existência desta correlação, no entanto, a diferença entre as porosidades das composições foi menor do que a diferença entre as suas resistências à compressão. É verdade que a resistência mecânica tende a relacionar-se de forma exponencial com a porosidade, mas em materiais homogêneos ou de idêntica composição (Mehta et al., 2006). A existência de maior volume de poros aumenta a probabilidade de defeitos no interior dos blocos, razão pela qual possam reduzir a sua resistência à compressão (Kerali, 2001). Contudo, não é só a porosidade que condiciona a resistência, mas também o grau de coesão com que as partículas do solo se encontram solidarizados nos BTC.

A elevada variação de resistência que pode ocorrer nos blocos devido a variações do teor de humidade, mesmo nas misturas estabilizadas, obriga a que seja necessário considerar coeficientes bastante penalizadores no seu dimensionamento. Neste caso, em face dos resultados obtidos e tendo em consideração a resistência em condições de laboratório, como sendo o de referência, podem-se sugerir fatores de 0,55 e 0,44 para as misturas só com cimento ou cimento e cal, respetivamente. Em relação à mistura N, aconselha-se a sua utilização apenas em ambientes secos sem possibilidade de contacto prolongado com a água.

4.5.1.1. Evolução temporal da resistência à compressão

Na Figura 53, e na Tabela 28, apresenta-se a evolução temporal da resistência à compressão dos blocos condicionados em ambiente de laboratório, pois, conforme mencionado anteriormente, este é o condicionamento mais próximo das condições de serviço dos BTC. Note-se que os valores apresentados para 7 dias de idade referem-se a blocos com um teor de humidade mais elevado que o referente ao ambiente de laboratório.

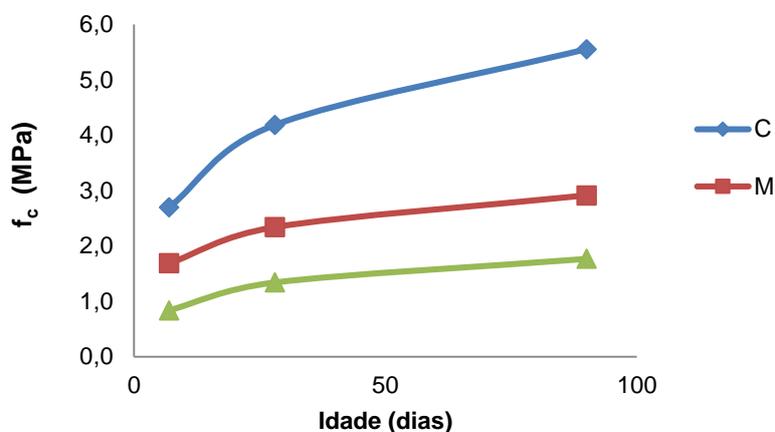


Figura 53 - Evolução temporal da resistência à compressão (condicionamento em ambiente de laboratório)

Tabela 28 – Evolução temporal da resistência à compressão (condicionamento em ambiente de laboratório) por intervalos. Percentagens referentes à resistência à compressão aos 90 dias.

Mistura	$\Delta f_{c,7-28d}$ (MPa)	$\Delta f_{c,28-90d}$ (MPa)	7 dias (%)	$\Delta f_{c,7-28d}$ (%)	$\Delta f_{c,28-90d}$ (%)
C	1.48	1.37	49	27	25
M	0.65	0.57	58	22	20
N	0.50	0.43	47	28	24

Verifica-se, por análise da Tabela 28 que, em termos percentuais, a evolução da resistência à compressão até aos 7 dias foi bastante próxima entre as misturas M e N. A evolução de resistência na mistura C, beneficiada pela hidratação do cimento, é ligeiramente superior à dos restantes. Dado que as misturas a partir dos 7 dias sofreram uma redução do seu teor de humidade, a taxa de evolução da resistência tende a ser superior ao que se verificaria caso as condições de humidade fossem uniformes ao longo do tempo. Bahar et al. (2004) verificaram que o ganho, relativo, da resistência entre blocos estabilizados e não estabilizados foi próximo, existindo um aumento da taxa de evolução com o aumento da proporção de cimento, e com a alteração das condições de cura dos blocos (secagens mais rápidas). Conclui-se da Figura 53 que a evolução da resistência nas misturas M e N relaciona-se com o ganho de coesão da fração silte/argila.

Apesar da evolução temporal das três composições ser semelhante, em termos percentuais, a mistura M teve um crescimento relativo maior nos primeiros 7 dias (58%), mas menor nos restantes intervalos (22% e 20%). Tal se deve ao facto destas misturas apresentarem uma fraca evolução da resistência até aos 90 dias de idade, aparecendo crescimentos relativos de resistência superiores aos 7 dias. Em face dos resultados obtidos a diferentes idades e tendo em consideração o fraco incremento de resistência verificado em todas as misturas a partir dos 28 dias de idade, julga-se que, tal como tal como realizado para as misturas comênticias correntes, é apropriado estabelecer como valor de referência aos 28 dias de idade de idade, tal como sugerido por Adam (2001), Kerali (2001), Namango (2006), Riza et al. (2010) e Walker (1995).

4.5.1.2. Eficiência estrutural dos BTC

Conforme realizado nos mais variados documentos da engenharia, é frequente relacionar a massa volúmica e a resistência à compressão dos materiais. Conforme referido no Capítulo 2, em geral, verifica-se que a resistência à compressão e a durabilidade dos BTC é proporcional à sua massa volúmica. Na Figura 54 apresenta-se a relação entre a resistência à compressão média (f_{cm}), aos 28 dias, e a massa volúmica (ρ) obtida para o presente trabalho. Esta grandeza dá uma melhor ideia da potencialidade deste material em soluções estruturais. De facto, qualquer uma destas propriedades é afetada de forma idêntica pela porosidade. Porém, essa relação pode não ser válida quando se tem em consideração simultaneamente BTC produzidos com diferentes tipos de ligantes ou diferentes teores de humidade. Por exemplo, o teor de humidade tende a aumentar a massa volúmica ao contrário do que sucede com a resistência à compressão (Figura 54).

Na Figura 54 confirma-se uma clara superioridade das misturas estabilizadas, em especial da mistura C, demonstrando ser a mais eficiente tendo em conta este critério. Esta diferença tende a

aumentar com o teor de humidade, dado que existe uma maior depreciação das misturas sem ligante hidráulico. Tendo em consideração provetes secos, a mistura com cimento apresenta uma eficiência estrutural cerca de 39% superior à da mistura com cal e cimento e cerca de 54% superior face à mistura não estabilizada. Esses valores aumentam para 40% e 66% nas misturas condicionadas em ambiente de laboratório. Estes valores demonstram, mais uma vez, a grande vantagem de se proceder à estabilização da terra nos BTC.

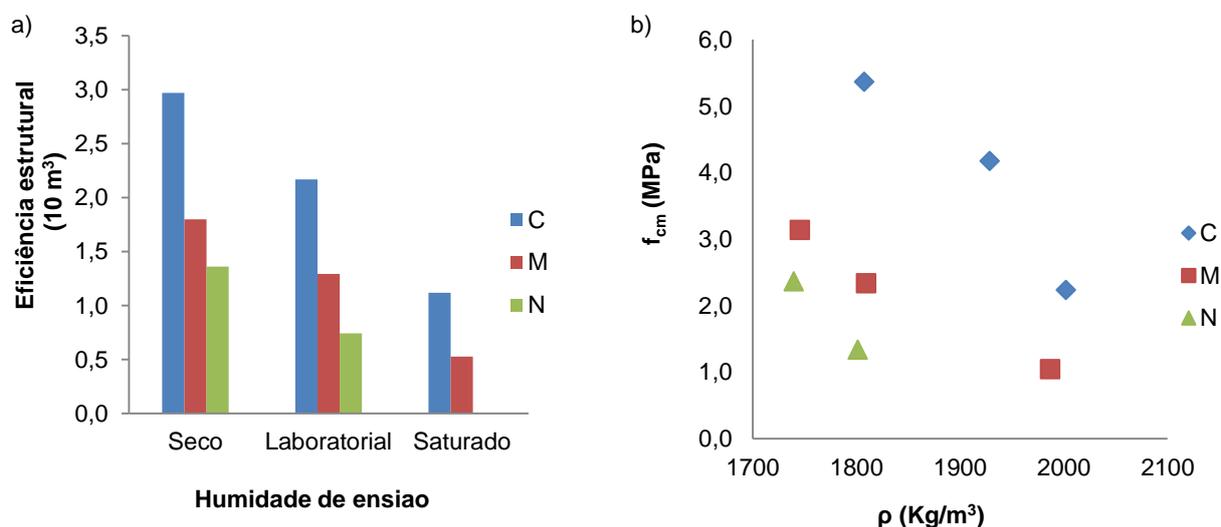


Figura 54 – Propriedades dos BTC: a) Eficiência estrutural dos BTC b) Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos BTC

Conforme referido, aumento do teor de humidade nos BTC tem duas consequências: o aumento da massa volúmica, neste ponto considerado prejudicial devido ao aumento da massa do bloco; e a diminuição da resistência à compressão. No entanto, o teor de humidade tem um maior impacto na resistência à compressão do que na massa volúmica. Em termos percentuais, a diminuição da resistência é aproximadamente 10 vezes superior ao aumento da massa volúmica, devido ao aumento do teor de humidade. Isto é, enquanto a massa volúmica dos provetes secos aumenta cerca de 7% em ambiente de laboratório, a resistência à compressão dos provetes nas mesmas condições diminui cerca de 67%.

4.5.2. Resistência à tração

Conforme referido nos capítulos anteriores, de modo a caracterizar a resistência à compressão dos BTC, realizaram-se ensaios de resistência à tração; por flexão, e por compressão diametral. Na Tabela 29 resumem-se os resultados médios obtidos nestes ensaios e no Anexo VIX apresentam-se mais detalhadamente os resultados referentes a cada uma das composições ensaiadas. Apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à tração nas Figuras 55 e 56, bem como a influência do teor de humidade na mesma. Nas Figuras 55 e 56 é feita ainda uma comparação entre os resultados obtidos e os resultados reportados por outros autores.

Tabela 29 - Resultados médios dos ensaios de resistência à tração

Ensaio	Humidade de ensaio	Mistura	f_{ctm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm}/f_{ctm} (%)
Compressão diametral	Laboratorial	C	0.61	4.18	15
		M	0.21	2.34	9
		N	0.08	1.34	6
	Húmido	C	0.67	3.84	17
		M	0.38	2.01	19
		N	0.12	1.02	12
Flexão	Laboratorial	C	1.19	4.18	28
		M	0.68	2.34	29
		N	0.25	1.34	19

A resistência à tração dos BTC é, em geral pouco significativa, apresentando valores muito baixos, conforme é esperado dos materiais cimentícios, em geral. De referir, que, dado os valores serem muito baixos, em especial nas misturas não estabilizadas, a precisão dos resultados é reduzida, dificultando a interpretação dos resultados dos ensaios.

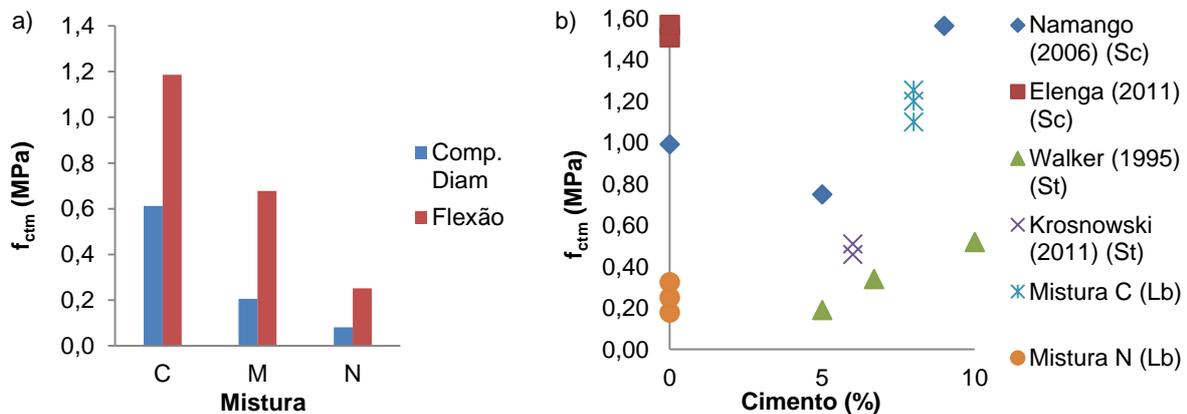


Figura 55 – a) Resistência à tração (condicionamento em ambiente de laboratório) obtido nos diferentes ensaios de tração b) Resistência à flexão reportado por outros autores com teores de humidade variáveis (Sc, St, Lb)

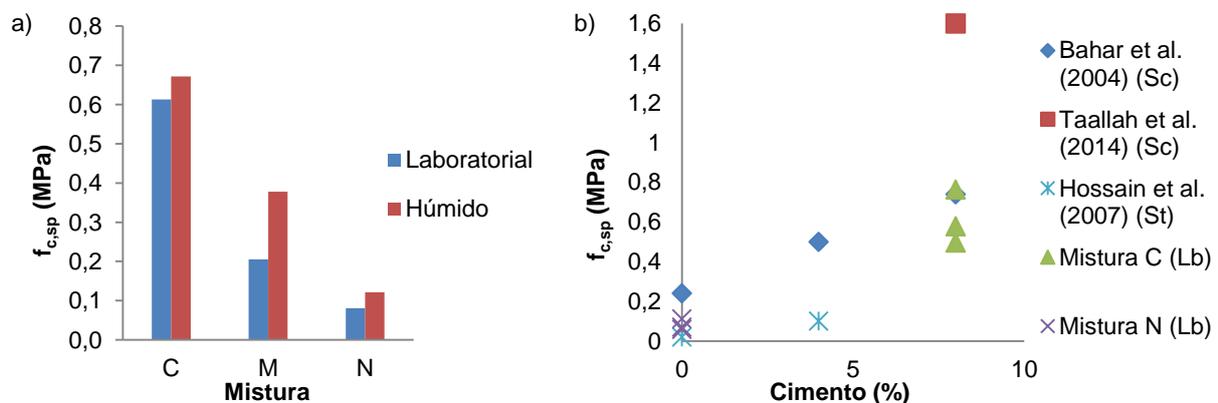


Figura 56 – Tração por compressão diametral: a) Resultados do ensaio de tração por compressão diametral b) Resultados reportados por outros autores com diferentes teores de humidade (Sc, St, Lb)

No que se refere às resistências à tração (por flexão e compressão diametral) dos BTC reportados por outros autores, (Figuras 55 (b) e 8 (b)), os resultados obtidos apenas se encontram

dentro dos mesmos nos blocos saturados, independentemente da composição e do ensaio realizado (ver também Tabelas 6 e 7). Os autores Elenga (2011), Namango (2006) e Taallah et al. (2014) apresentaram valores, no estado seco, superiores a ambas as misturas, C e N (não se encontrou na bibliografia ensaios desta natureza realizadas em blocos semelhantes ao da mistura M). Contudo, os autores; Elenga (2011) e Taallah et al. (2014) produziram os seus blocos com a incorporação de fibras de diversos materiais, pelo que, independentemente do tipo de ensaio à tração, seria expetável que as suas resistências à tração fossem superiores. A justificação para as resistências à tração apresentadas por Namango (2006) serem superiores resulta essencialmente dos seguintes aspetos: os provetes foram ensaiados no estado seco, correspondendo ao estado de resistência mecânica máxima dos BTC; a distância entre o apoio superior e um dos apoios inferiores; a altura do provete é menor, resultando em tensões de tração de rotura maiores. Namango (2006) utilizou provetes com 160 X 40 X 40 (mm), para um vão de apoio de 100 mm, pelo que a razão é de 1,25 (50/40 mm). Ao passo que a razão resultante do ensaio realizado no presente estudo foi de aproximadamente 1,39 (125/90 mm).

Em relação à resistência à flexão, conforme é bem reconhecido, este tende a sobrestimar a resistência à tração, dado que ocorre uma distribuição não linear de tensões na secção (Dreux et al., 2002). De acordo com Cánovas et al. (1996) em betões a resistência à flexão pode ser cerca de duas vezes superior à obtida por compressão diametral. Os ensaios de tração, tanto por compressão diametral, como por flexão, sobrestimam a resistência à tração dos BTC (2.8.1.2). À semelhança do que acontece no betão (Araújo, 2001; Costa et al., 2002), nos BTC, o ensaio de tração por flexão conduziu a valores de resistência à tração maiores que à compressão diametral, devido à diferença de tensões de tração aplicadas ao longo da altura do provete (máximas na parte inferior) no ensaio por flexão.

No presente estudo, a resistência à flexão nas misturas C, M e N foi cerca de 28%, 29% e 18% da resistência à compressão, respetivamente. No ensaio de tração por compressão diametral (Figura 56 (a)), teoricamente, o aumento do teor de humidade deveria resultar numa diminuição da resistência à tração dos blocos, conforme constatado para a resistência à compressão. Porém, obteve-se uma tendência oposta. Existem dois fatores que, em conjunto, podem estar na origem deste fenómeno: a elevada proximidade dos resultados obtidos aliado à reduzida precisão dos resultados; o desenvolvimento de gradientes de humidade nos provetes condicionados em ambiente de laboratório. Os gradientes de humidade induzem um campo de tensões autoequilibrado nos blocos, instalando-se tensões de tração nas fibras extremas. Essas tensões de tração geram microfissuração que contribui para a redução da resistência à tração.

Conforme referido no Capítulo 2, constata-se que a resistência à tração evolui no mesmo sentido da resistência à compressão (Figura 57), o que se justifica pelo facto de ambas as propriedades serem essencialmente afetados pelos mesmos fatores, em especial, a porosidade do material. Deste modo, a utilização do ensaio de tração por flexão é um bom indicador da qualidade de um bloco na fase de produção, ou na inexistência de equipamento para se proceder ao ensaio de compressão.

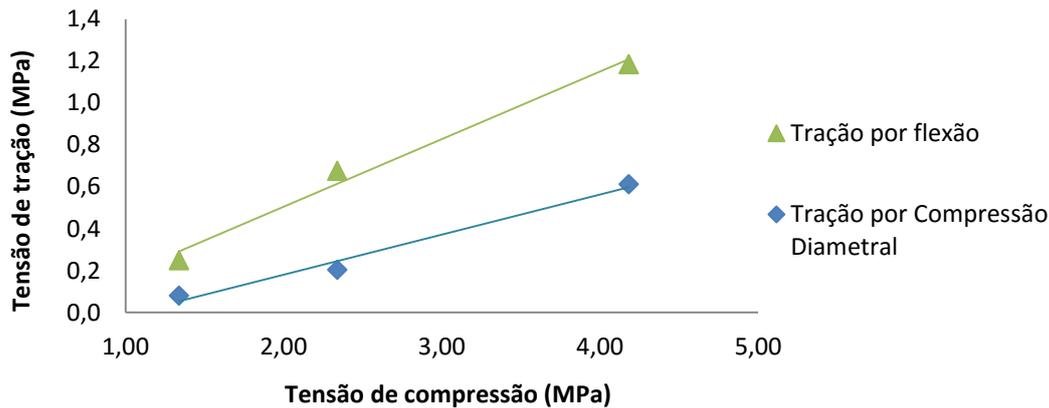


Figura 57 - Gráfico de comparação entre as resistências mecânicas dos BTC (provets condicionados em ambiente de laboratório).

Para as misturas C, M e N, curados em ambiente de laboratório, verificaram resistências à tração de cerca de 15%, 9% e 6% da resistência à compressão, respetivamente. Estas percentagens de resistência estão de acordo com valores usualmente reportados para betões com cimento Portland (8 a 10%, Roberts-Wollmann et al., 2006). Taallah et al. (2014) obteve relações semelhantes, (14%) recorrendo a provetes condicionados em ambiente seco. Bahar et al. (2004) obteve um valor ligeiramente superior (cerca de 20%), embora tenha utilizado cilindros de solo estabilizados e não BTC. Por sua vez, a resistência à tração por flexão atinge, em média, 1/4 da resistência à compressão, em todas as misturas estudadas. Nas misturas C, M e N esta relação foi cerca de 28%, 29% e 18%, respetivamente. Esta relação foi determinada para provetes condicionados no ambiente de laboratório, no entanto, e apesar de ser ligeiramente inferior, considera-se que a mesma está de acordo com as relações determinadas por Namango (2006), Krosnowski (2011) e Walker (1995), respetivamente: 25%; 17%; e 14%. A relação apresentada por Namango (2006), refere-se a resistências no estado seco, e as ultimas duas relações apresentadas referem-se a resistências no estado saturado. De facto a relação diminui com o aumento do teor de humidade, pois a influência da humidade na resistência à tração por flexão dos BTC tende a ser mais prejudicial do que na sua resistência à compressão, devido a efeitos relacionados com a geração de gradientes de humidade na espessura dos provetes.

4.6. Velocidade de propagação de ultrassons ($V_{\mu s}$)

Neste ponto do trabalho procura-se caracterizar a velocidade de propagação de ultrassons dos BTC. Na bibliografia consultada não se encontra praticamente nenhuma referência à aplicação deste ensaio nos BTC.

Apenas Chan et al. (2010) efetuaram os ensaios de medição da velocidade de propagação dos ultrassons em BTC. Os autores estudaram a estabilização de solos argilosos com adição de areia e cimento como estabilizador, através da produção de cilindros de solo compactados. No entanto, os resultados obtidos por Chan et al. (2010) não foram considerados, pois apresentaram velocidades de ultrassons anormalmente baixas, por comparação a valores usuais em terra crua. No respetivo

trabalho, foram reportadas dificuldades em garantir uma transmissão eficaz entre os transdutores e os provetes.

Na Figura 58 apresentam-se, graficamente, as velocidades médias de propagação de ultrassons obtidas aos 28 dias de idade. No Anexo X os resultados são indicados de forma mais detalhada.

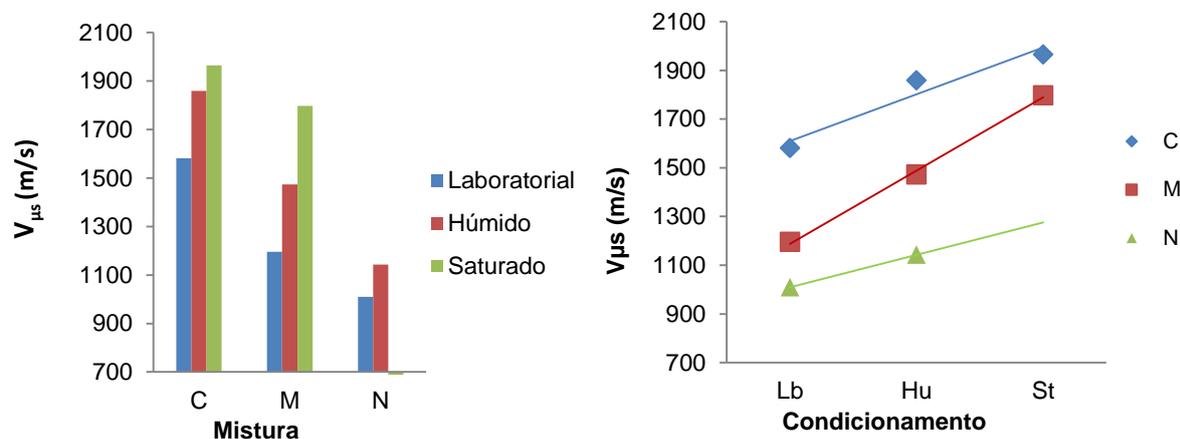


Figura 58 - Representação gráfica das velocidades de propagação de ultrassons nos BTC

Na Figura 58, é notória uma maior velocidade de propagação de ultrassons nas composições estabilizadas, sendo a mais elevada na mistura C, independentemente da humidade de ensaio dos provetes. Confirma-se assim, que a velocidade de propagação dos ultrassons variou de forma proporcional à resistência à compressão (Neville, 1995). Neville (1995) afirma que, no betão, a velocidade de propagação dos ultrassons é proporcional à massa volúmica dos elementos. Para um dado teor de humidade o mesmo pode ser concluído no presente trabalho. Conforme referido por outros autores, Pundit (1991) e Trtnik et al. (2008), a velocidade de ultrassons aumenta com o incremento do teor em água para todas as misturas. Na mistura N não são indicados os valores para o estado saturado, dado que a mistura desagregou-se. O aumento da velocidade de propagação entre os provetes conservado em laboratório e os provetes húmidos foi semelhante em todas as misturas e cerca de 15% em média. A diferença da velocidade de propagação entre os provetes saturados e os húmidos, variou entre as misturas (estabilizadas apenas) sendo de apenas 5% para a mistura C e 33% para a mistura M. Este último valor, pode estar relacionado com a maior porosidade da mistura M, existindo um maior preenchimento dos poros não preenchidos no estado húmido.

Bahar et al. (2004) determinaram o módulo de elasticidade de cilindros de terra estabilizada. Através da Expressão (14), procurou-se estimar a velocidade de propagação de ultrassons que os cilindros apresentariam de modo a comparar com os resultados da Figura 58. Na Expressão (14), E é o módulo de elasticidade dinâmico, ρ é a massa volúmica (mesmo teor de humidade) e ν é o coeficiente de poisson dos BTC (considerado como sendo 0,2). Na Tabela 30 apresenta-se a comparação entre as velocidades de propagação obtidas no presente trabalho e as velocidades de propagação estimadas com base no trabalho de Bahar et al. (2004).

$$V_{\mu s} = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad [m/s] \quad (14)$$

Tabela 30 - Comparação entre as velocidades de propagação dos ultrassons, blocos produzidos VS composições equiparáveis de Bahar et al., (2004) com alguns valores utilizados.

Composição	ρ (kg/m³)	E (GPa)	$V_{\mu sm}$ (m/s)
N (Não estabilizada)	1740	-	1010
C (Cimento 8%)	1810	-	1582
Não estabilizada (Bahar et al., 2004)	1760	1.89	1092
Cimento (10%) (Bahar et al., 2004)	1830	2.51	1234

Segundo as estimativas efetuadas, a composição N apresenta uma velocidade de propagação de ultrassons semelhante à da composição não estabilizada de Bahar et al. (2004) . Por sua vez a composição C apresenta maior velocidade do que a estimada para a composição de Bahar et al. (2004). Por outro lado, Bahar et al. (2004), não apresentaram o valor da massa volúmica para a composição estabilizada com cimento pelo que a mesma teve de ser estimada com base na sua massa volúmica não estabilizada e a percentagem de cimento utilizada. Note-se que na estimativa realizada, consideraram-se os valores do módulo de elasticidade estático indicados pelo autor, que tendem a ser inferiores aos correspondentes módulos dinâmicos. Assim, seriam esperados menores velocidades de propagação de ultrassons nos cilindros produzidos por Bahar et al., (2004). Acrescenta-se ainda o facto de as velocidades de propagação das composições N e C terem sido medidos em provetes com teor de humidade laboratorial, o que não é tido em consideração nos valores estimados do trabalho de Bahar et al., (2004). Ainda assim, apesar das limitações referidas na comparação entre resultados, são obtidos valores da mesma grandeza. Segundo a classificação do IAEA (2002), para a qualidade de betão baseado na sua velocidade de propagação de ultrassons, os BTC classificam-se como “betões muito fracos” por apresentarem velocidades de propagação menores do que 2000 m/s.

4.7. Condutibilidade térmica

Neste ponto caracteriza-se a condutibilidade térmica dos BTC produzidos, e analisa-se a influência do teor de humidade, da composição e da porosidade dos blocos. Os resultados, médios, obtidos no ensaio de medição da condutibilidade térmica resumem-se na Tabela 31, e apresentam-se em maior detalhe no **Anexo XI**. Os resultados da Tabela 31 são apresentados graficamente na Figura 59.

De um modo geral, constata-se que as condutibilidades térmicas determinadas no presente trabalho corroboram com os valores documentados por outros autores na literatura consultada (Tabela 2). Porém, não é possível efetuar uma comparação rigorosa entre os vários resultados, visto que os diferentes autores apresentam blocos com diferentes composições e sobretudo diferentes

teores de humidade de ensaio. Adam et al. (1995) produziu blocos com menor proporção de cimento, e com uma pressão de compactação muito superior. Lourenço (2002) produziu blocos com 8% de cimento, apresentado a mesma condutibilidade térmica que a mistura C com humidade laboratorial. Num estudo também realizado no Instituto Superior Técnico sobre as propriedades térmicas de BTC incorporando diferentes materiais isolantes, Sampaio et al. (2014) ensaiou blocos de terra não estabilizados produzidos no mesmo local e recorreu ao mesmo equipamento de medição utilizado no presente trabalho. Nos blocos ensaiados em condições de humidade laboratorial, a condutibilidade térmica foi idêntica, ao passo que em blocos secos, obteve condutibilidades térmicas ligeiramente inferiores.

Tabela 31 - Resultados médios do ensaio de medição da condutibilidade térmica dos BTC

Humidade de ensaio	Mistura	λ_m (W/mk)
Seco	C	0.65
	M	0.61
	N	0.58
Laboratorial	C	0.87
	M	0.72
	N	0.65
Húmido	C	1.01
	M	1.11
	N	0.71
Saturado	C	1.34
	M	1.47
	N	-

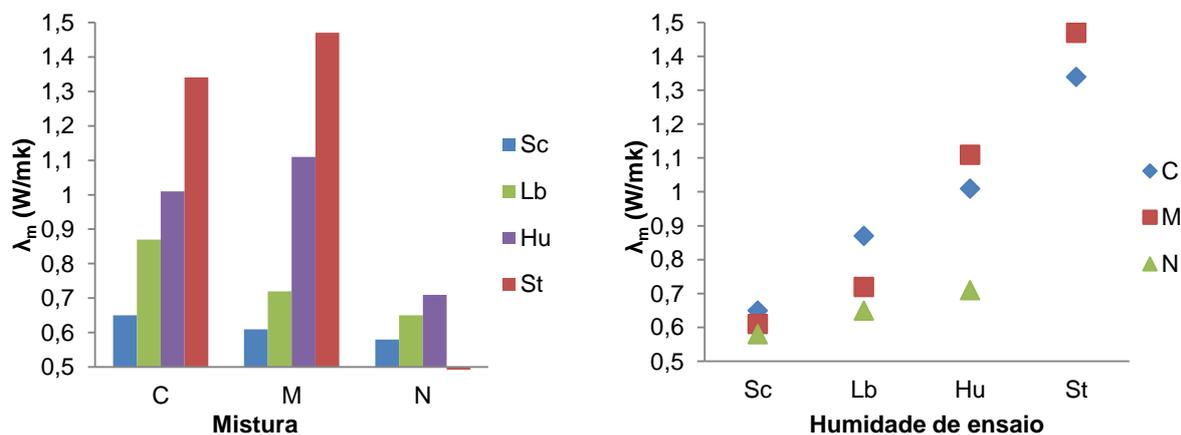


Figura 59 - Representação gráfica da condutibilidade térmica dos BTC

Conforme seria de esperar, a condutibilidade térmica aumentou proporcionalmente com o teor em água. De facto, a água apresenta uma condutibilidade térmica cerca de 25 vezes superior à da terra (Ashworth, 1991). É também notável que a mistura que apresenta a maior condutibilidade térmica nem sempre seja a mesma, estando dependente do teor de humidade dos provetes. A variabilidade do coeficiente de condutibilidade térmica entre misturas foi mais baixa no estado seco devido à inexistência de humidade nos blocos. A condutibilidade térmica da mistura N é a mais baixa

independentemente do teor de humidade dos provetes. No estado seco a condutibilidade térmica da mistura N é, em média, apenas 8% mais baixa do que a condutibilidade térmica das misturas estabilizadas. No entanto, esta diferença é mais significativa quanto maior for o teor de humidade dos blocos, sendo que, a mistura N é, em média, 18% mais baixa que as misturas estabilizadas em ambiente laboratorial e 33% no estado húmido. Deste modo, a utilização de blocos não estabilizados apresenta uma mais-valia, no que se refere ao isolamento térmico das construções em BTC, contudo a sua utilização poderá não se justificar, devido à sua inferior capacidade mecânica e ao seu comportamento em contacto com a água.

Para menores teores de humidade, isto é; provetes secos e provetes condicionados em ambiente de laboratório, a mistura C apresenta maior condutibilidade térmica que a mistura M. Nos provetes com maior teor de humidade a situação inverte-se. Como já foi apresentado, a massa volúmica da mistura C é superior à mistura M. Assim sendo, é natural que, para os condicionamentos de baixo teor de humidade, a mistura C apresente uma condutibilidade térmica maior que a mistura M. No entanto, a maior porosidade, e conseqüentemente permeabilidade, da mistura M face à mistura C fazem com que a mistura M apresente uma condutibilidade térmica superior em provetes com maior teor de humidade, mesmo possuindo uma massa volúmica inferior à da mistura C.

Os valores das condutibilidades térmicas dos provetes condicionados em ambiente de laboratório são os mais próximos da realidade, pelo que se optou por considerar estes como de referência. Em média, a redução da condutibilidade térmica com a secagem dos provetes foi de 17%, em que a mistura C apresentou a maior redução (25%). Quando húmidas, as misturas N e C apresentam um ligeiro aumento, de 9% e 16% respetivamente, contudo a mistura M apresenta um aumento de 54,2%. Com o aumento do teor de humidade, isto é, saturando os provetes, a tendência mantém-se, pois, a mistura M tem um aumento que é praticamente duas vezes maior do que o aumento registado na mistura C (104% na mistura M em relação a 54% na mistura C). A variação da condutibilidade térmica entre misturas com o mesmo teor de humidade (mesmo condicionamento dos provetes) é menor que a variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade de uma dada mistura. Isso demonstra a influência do teor de humidade no desempenho térmico dos BTC. De facto, constata-se que entre as condições secas e saturadas o coeficiente de condutibilidade pode aumentar entre 2 a 2,5 vezes.

4.8. Durabilidade

Nos próximos pontos procede-se à caracterização da durabilidade dos BTC, tendo em atenção algumas propriedades relevantes. Conforme referido em 2.8.3, a durabilidade dos BTC é influenciada por vários fatores e mecanismos de deterioração, que geralmente ocorrem em simultâneo. Dado a sua relevância, o presente trabalho foca-se essencialmente nos mecanismos de deterioração resultantes da ação da água, procedendo-se à caracterização dos BTC em termos das suas propriedades de transporte (permeabilidade, absorção de água por imersão e por capilaridade), e da resistência à erosão por ação da água por gotejamento e por jacto de água sobre pressão (erosão acelerada). Os resultados dos ensaios são comparados com os valores usuais

documentados na bibliografia consultada e os BTC produzidos são classificados de acordo com o indicado na normalização específica para o tipo de ensaios realizados. Sempre que possível, é feita a comparação com as propriedades mecânicas e físicas dos BTC discutidos nas secções anteriores.

4.8.1. Permeabilidade à água

A permeabilidade de um material relaciona-se com a sua porosidade aberta, nomeadamente com a forma como ocorre a conectividade entre poros. Deste modo, a permeabilidade dos BTC é caracterizada tendo em conta a sua porosidade (4.2.1.), e os ensaios de permeabilidade à água (K_w) realizados.

Para a medição da porosidade recorreu-se ao ensaio referido em 3.7.3.1.1 apresentando-se os resultados obtidos na Tabela 32. Foi impossível determinar a permeabilidade da mistura N, pois os provetes tiveram que ser ensaiados em condições saturadas, para as quais ocorre desagregação dos blocos.

Tabela 32 - Resultados do ensaio de permeabilidade

Mistura	Nº provete	K_w (m/s)	K_w médio (m/s)
C	19	3.401E-07	3.21E-07
	22	3.210E-07	
	41	3.019E-07	
M	17	1.101E-06	9.82E-07
	34	Rejeitado	
	39	8.636E-07	

O caudal de água que atravessou o provete M34 foi anormalmente elevado relativamente aos restantes provetes ensaiados, pelo que os seus resultados foram rejeitados. Não se apresentando visivelmente fraturado, verificou-se que o maior caudal de água registado se deveu a uma falta de estanqueidade aquando da colocação do provete no equipamento. É ainda provável que haja alteração da microestrutura dos blocos durante o ensaio, afastando-se a permeabilidade determinada da real.

A permeabilidade é uma propriedade pouco estudada nos BTC, provavelmente devido à sua dificuldade de execução e consequente falta de um ensaio normalizado. Na bibliografia consultada, apenas Bahar et al. (2004) caracterizaram esta propriedade. Os autores investigaram o efeito da estabilização da terra com cimento na permeabilidade à água, ensaiando cilindros de terra estabilizados e compactados (molde Proctor) com diferentes proporções de cimento. As permeabilidades obtidas foram de $7,5 \times 10^{-8}$ m/s para cilindros com 10% cimento sendo esta composição a mais próxima da mistura C, com 8% cimento. Assume-se que a maior permeabilidade obtida para a mistura C se deva à utilização de uma relação a/c superior à utilizada por Bahar et al. (2004), de 1,21, pois, conforme mencionado, uma maior relação a/c conduz a maiores permeabilidades. Outros fatores como a incerteza associada às pressões de compactação utilizadas nos cilindros de Bahar et al., (2004). Conforme se concluiu em 4.2.1, a pressão de compactação é o fator mais influente na porosidade dos BTC.

Na literatura consultada não se encontrou informação sobre a permeabilidade de BTC estabilizados com cal, pelo que a análise da mistura M apenas serve de comparação entre as misturas produzidas. A mistura M apresenta uma permeabilidade 3 vezes maior do que a permeabilidade da mistura C. Já foi verificado em 4.2.1, que a mistura M tem maior porosidade que a mistura C, por apresentar maior relação a/c. No entanto a porosidade é apenas 3% superior. Segundo a Figura 60, a permeabilidade de pastas cimentícias aumenta exponencialmente com a porosidade, como tal, pequenas variações em torno de 30% de porosidade, como é o caso entre as misturas C e M, conduzem a aumentos exponenciais de permeabilidade. Note-se que os valores obtidos (Tabela 32) não são comparáveis com os da Figura 60 dado que abrangem estruturas porosas com distribuição e desenvolvimento de poros diferentes. A porosidade nos BTC é mais grosseira e interconectada. De acordo com os resultados obtidos e a tendência verificada na Figura 60, o que se pode concluir é que na mistura C, a maior dosagem de ligante contribui essencialmente para a redução da conectividade da estrutura porosa.

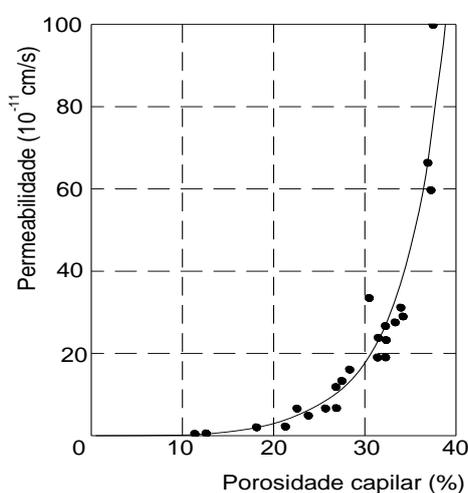


Figura 60 - Relação entre a porosidade capilar (%) e a permeabilidade de pastas de cimento (10^{-11} m/s) (Powers, 1958)

4.8.2. Absorção de água por imersão

Ao longo da campanha experimental, sempre que se procurou caracterizar os blocos produzidos no seu estado saturado, a composição não estabilizada desintegrou-se no instante da sua submersão. A desintegração dos BTC não estabilizados e sem qualquer proteção superficial foi sempre observada na literatura consultada (Adam et al., 1995; Cid-Falceto, 2012; Galíndez, 2009; Ngowi, 1997; Ozkan et al., 1995). Assim sendo, pode-se concluir, uma vez mais que os BTC não estabilizados não são adequados para locais em que seja expetável um contacto prolongado com a água. Por sua vez, as composições estabilizadas, mantiveram-se intactas após 48 horas de submersão, não apresentando qualquer alteração, ao nível visual, da sua integridade e geometria, sendo possível o manuseamento dos blocos sem os danificar.

Tabela 33 - Absorção de água dos BTC

Mistura	A (%)	
	24 Horas	48 Horas
C	13.59	13.94
M	16.49	16.74
N	-	-

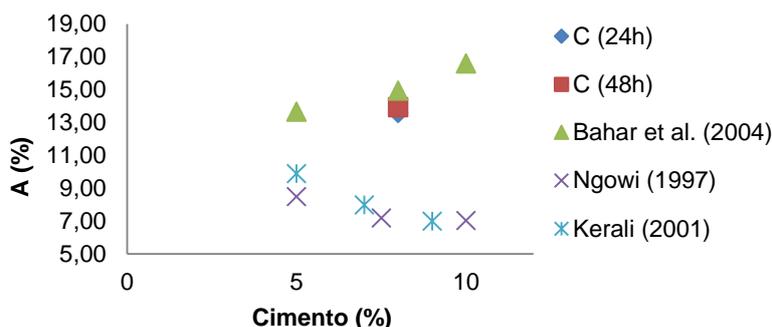


Figura 61 - Absorção de água da mistura C em comparação com o reportado por outros autores

Em termos percentuais, relativo à massa dos blocos, obtiveram-se as absorções de água resumidas na Tabela 33. A maior absorção de água da mistura M deve-se ao facto de esta apresentar maior porosidade e conectividade. Conforme observado em 4.2.3.1, a permeabilidade da mistura M foi três vezes maior do que a permeabilidade da mistura C, ao passo que a absorção de água foi apenas ligeiramente superior. De facto, não se devem relacionar as duas propriedades, dado que medem fenómenos diferentes. A maior permeabilidade da mistura M deve-se à maior conectividade da estrutura porosa. Isso é possível verificar pelo menor poder de absorção na mistura M após 24 horas, sugerindo um mais rápido preenchimento da maioria dos seus poros nas primeiras 24 horas. A maior absorção de água da mistura M traduz o maior volume de porosidade aberta face à mistura C. A variação da quantidade de água absorvida entre as 24 horas e as 48 horas foi de tal forma reduzida que se assume que os blocos estariam praticamente saturados após 48 horas de submersão. Considerando o procedimento de ensaio utilizado (3.7.3.1.2), de acordo com a classificação da norma NBR 8492 (1984) (apenas para blocos estabilizados com cimento), as misturas estabilizadas C e M são consideradas válidas e podem ser aplicadas em ambientes húmidos por apresentarem coeficientes de absorção de água menores que 20%.

Na Figura 61 apresentam-se absorções de água nos BTC reportadas por outros autores na literatura consultada (ver também Tabela 11). Por análise direta, as absorções de água dos blocos produzidos parecem superiores aos valores referidos por outros autores, indicando assim uma menor qualidade dos blocos produzidos. No entanto, não se pode fazer uma comparação direta sem ter em conta outros fatores, como a composição dos BTC e o processo de produção adotado. Bahar et al. (2004) apresenta uma absorção de água para terra estabilizada com 8% de cimento superior à da mistura C. No entanto, conforme mencionado, o mesmo utilizou cilindros compactados no molde Proctor, pelo que a sua compactação não é comparável com a compactação dos BTC. As composições estabilizadas com cimento, de Kerali (2001) e de Silveira et al. (2012) apresentam absorções de água muito inferiores à da mistura C pois os seus blocos foram produzidos com pressões de compactação muito mais elevadas. Conforme mencionado, o aumento da pressão de compactação resulta numa diminuição da porosidade dos BTC, traduzindo-se assim numa diminuição da quantidade de água absorvida pelos blocos. Cid-Falceto (2012), refere valores de absorção de água semelhantes aos da mistura C, tendo em conta também blocos estabilizados com cimento. No

entanto, apenas refere que os blocos foram fabricados industrialmente (recorrendo a uma prensa hidráulica), pelo que não pôde apresentar a sua composição exata nem condições de produção. Como os blocos de Cid-Falceto (2012) foram produzidos com uma pressão de compactação superior, não seriam de esperar absorções semelhantes. Assim, acredita-se que os seus blocos estabilizados com cimento tenham utilizado uma dosagem de cimento menor do que 8%. Rix (1998) procurou analisar a possibilidade de usar um resíduo de uma estação de tratamento de água, muito argilosa e siltosa, na produção de BTC, pelo que o seu comportamento não será o mais usual nos BTC. Apesar da maior pressão de compactação utilizada por Kerali (2001), na produção de uma mistura com 9% de cimento e outra com 5% de cal e cimento (cada), a diferença entre as absorções destas duas composições foi semelhante à diferença obtida entre as misturas C e M. Confirma-se o referido por Kerali (2001), em que a substituição de cal por cimento aumenta a porosidade dos BTC, sendo mais durável a estabilização apenas com cimento. Como a absorção de água é proporcional à porosidade dos BTC, e a porosidade tem uma relação inversa com a resistência mecânica e a durabilidade, é possível recorrer ao ensaio de absorção de água para controlo de qualidade das misturas.

4.8.3. Absorção de água por capilaridade

Na Tabela 34 resumem-se os coeficientes de absorção de água médios (C_b) dos BTC produzidos obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade (3.7.3.3). **No Anexo XII** apresenta-se os resultados da Tabela 34 de forma mais detalhada. A Figura 62 ilustra a evolução da absorção de água por capilaridade nos blocos produzidos. As misturas dos blocos indicados na Figura 62 são, da esquerda para a direita; M, C, M e N. Devido à dimensão dos blocos apenas foi possível ensaiar 4 blocos ao mesmo tempo, pelo que se efetuou o ensaio em dois tabuleiros distintos.

Tabela 34 – Coeficientes médios de absorção de água por capilaridade.

Mistura	C_b (g/cm ² min ^{1/2})							
	10 Minutos	20 Minutos	30 Minutos	60 Minutos	2 Horas	6 Horas	24 Horas	72 Horas
C	20.84	17.60	16.35	13.88	11.71	8.68	6.18	4.40
M	29.82	26.13	25.43	22.85	20.34	15.65	9.72	5.74
N	-	-	-	-	-	-	-	-

Tal como ocorreu no ensaio de absorção de água por imersão, a mistura M apresentou maiores coeficientes de absorção de água (C_b) do que a mistura C. A mistura N desagregou-se parcialmente em contacto com a água. A maior conetividade e porosidade da mistura M levou, a que o seu C_b e a sua altura de ascensão capilar, fossem maiores do que as obtidas na mistura C. Nas primeiras 6 horas de medição o C_b da mistura M foi, em média, 37% maior do que o coeficiente da mistura C, reduzindo-se para 30%, em média, no restante período de medição. Conforme se vê na Figura 63 g), a altura de ascensão capilar às 6 horas de medição, ainda não tinha chegado totalmente ao topo da mistura C contudo a altura de ascensão capilar da mistura M já cobria o provete. Na Figura 64 apresenta-se a evolução temporal da absorção capilar das misturas estabilizadas.

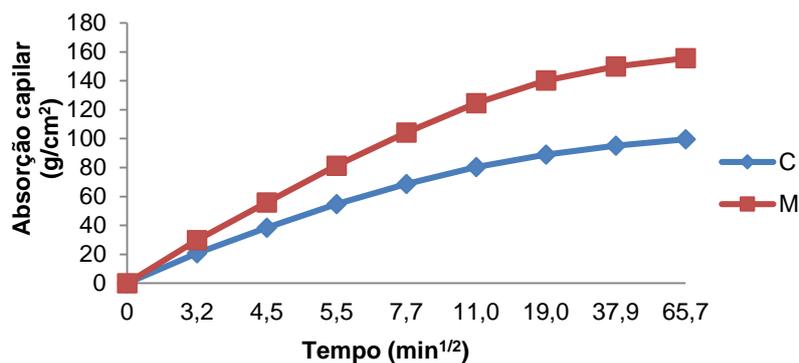


Figura 62 - Evolução temporal da absorção capilar nas misturas estabilizadas

Os provetes da mistura N, ao entrarem em contacto com os 5 milímetros de altura de água, desagregaram-se parcialmente tornando-se impossível a progressão do ensaio (Figura 63 (b)). A desagregação parcial da mistura N demonstra que os BTC não estabilizados são inadequados para qualquer aplicação em que haja contacto direto com a água.

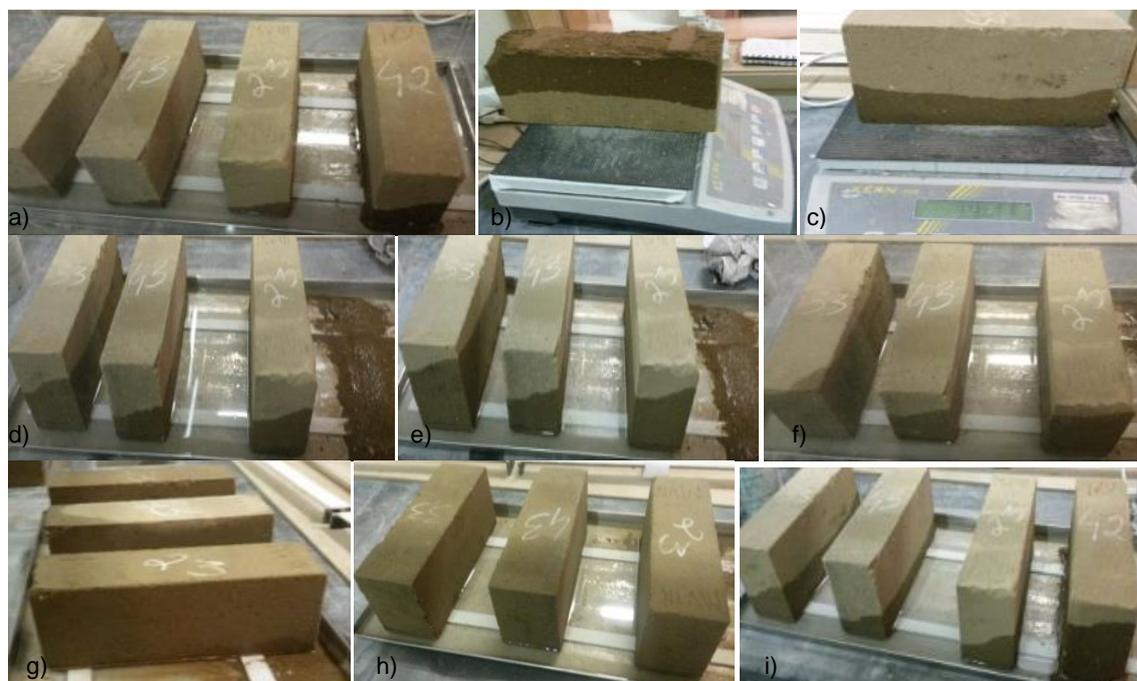


Figura 63 – Ensaio de absorção capilar: Ordem das misturas na figura: M,C,M,N (esquerda para a direita). Tempo de ensaio: a) 5 minutos; b) 10 minutos (Mistura N); c) 10 minutos (mistura C); d) 20 minutos; e) 60 minutos; f) 2 horas; g) 6 horas; h) 24 horas; i) 72 horas.

A altura de ascensão capilar nos blocos é maior numa das faces de enchimento, nomeadamente na face de enchimento de fundo dos blocos (Figura 63). O mesmo acontece em todos os blocos, independentemente da composição. A diferença de alturas de ascensão capilar deve-se à anisotropia da pressão de compactação dos blocos durante a sua moldagem. O movimento vertical, de baixo para cima, do prato inferior da prensa utilizada, resulta numa maior compactação da face de enchimento de topo (Morel et al., 2007), diminuindo a sua porosidade. Como a face de enchimento de fundo apresenta maior porosidade, maior é a altura de ascensão capilar na mesma.

Deste modo, os BTC apresentam uma anisotropia na sua compactação, traduzindo-se em níveis de compacidade e porosidade diferentes ao longo da sua altura. Esta anisotropia só poderá ser corrigida, caso se altere o mecanismo de funcionamento das prensas. No entanto, a utilização deste mecanismo é corrente em todas as prensas manuais de BTC.

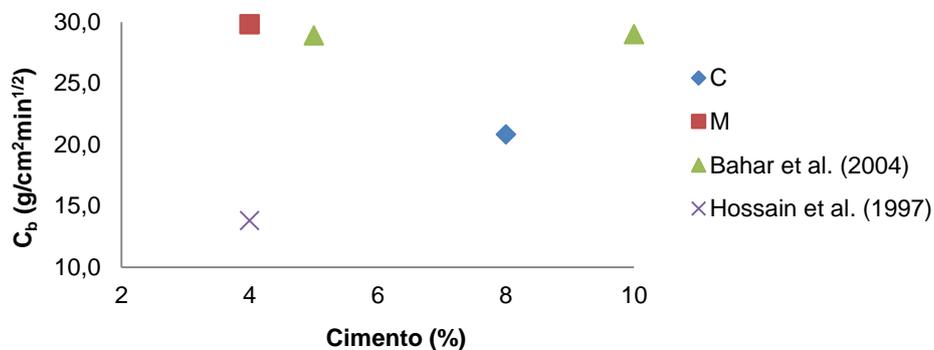


Figura 64 - C_b dos BTC em comparação com os C_b reportados por outros autores

Na Figura 64 apresentam-se os C_b de BTC reportados por outros autores na literatura consultada (ver também Tabela 11). Tal como mencionado no ensaio de absorção por imersão, a comparação direta entre resultados é complexa. Todos os C_b da Tabela 11 são determinados para um tempo de medição de 10 minutos, conforme indicado na maioria das normas específicas para os BTC. Cid-Falceto (2012) realizou o ensaio em BTC cuja composição e condições de produção não são conhecidas, sabendo-se apenas que foram produzidos com uma pressão de compactação muito superior. Como mencionado, a absorção de água por imersão de Cid-Falceto (2012) foi semelhante à da mistura C. No entanto, os valores de C_b foram muito inferiores aos dos blocos produzidos no presente trabalho. Este fato demonstra que o aumento da pressão de compactação, para além de diminuir a porosidade total dos BTC, diminui a conectividade da sua estrutura porosa. Bahar et al. (2004) e Hossain et al. (2007) utilizaram cilindros compactados em molde Proctor, pelo que conforme referido, tem uma pressão de compactação diferente da dos BTC, resultando em níveis de porosidades distintos. Hossain et al. (2007) obteve uma absorção menor do que a da mistura C, mesmo tendo em conta misturas com apenas 4% cimento. Para além disso o autor reporta a não desagregação das misturas não estabilizadas. O solo utilizado por este é extremamente argiloso, saindo fora dos limites sugeridos para a produção de BTC (2.7), pelo que, assume-se que os cilindros deste não se desagregaram nos primeiros 10 minutos do ensaio devido à elevada coesão do seu solo argiloso. Bahar et al. (2004) apresenta, tal como no ensaio de absorção por imersão, C_b superiores aos obtidos nos blocos produzidos no presente trabalho.

A norma colombiana NTC 5324 (2004) classifica os BTC com base no seu coeficiente de absorção de água por capilaridade (g/cm²min^{1/2}), em:

Blocos de fraca absorção capilar: $C_b < 20$ (inclusive)

Blocos de reduzida absorção capilar: $C_b < 40$ (inclusive)

Segundo a classificação da NTC 5324 (2004), os blocos da mistura M são considerados de reduzida absorção capilar e os blocos da mistura C de fraca absorção capilar. A norma permite ainda uma classificação para “blocos de aplicação em meio seco”. Dado o comportamento da mistura N, classifica-se os blocos desta mistura como sendo de “aplicação em meio seco”.

Como o C_b é calculado com base na medição dos pesos dos provetes (Expressão 11) foi possível, através do peso do provete húmido às 24 e às 72 horas de ensaio, estimar a absorção de água na forma do ensaio de absorção de água por imersão (Expressão 10). Apresenta-se esta absorção de água como A' na Tabela 35, fazendo-se a comparação entre a percentagem de água absorvida pelos blocos nos dois ensaios de absorção de água.

Tabela 35 - Comparação de resultados dos ensaios de absorção de água.

Mistura	A (%)		A' (%)	
	24 Horas	48 Horas	24 Horas	72 Horas
C	13.59	13.94	9.27	11.43
M	16.49	16.74	15.11	15.44

Verificou-se que a absorção de água por imersão é maior do que por capilaridade (Tabela 35). Não se atinge a mesma quantidade de água absorvida por capilaridade do que no ensaio de imersão, pois os BTC não chegaram ao estado saturado nas 72 horas do ensaio de capilaridade. A diferença entre as absorções de água, A e A' , é muito maior na mistura C do que na mistura M, dado que a taxa de absorção é superior em M. As absorções de água A e A' da mistura M são muito semelhantes entre si, demonstrando a elevada conectividade dos poros da mistura, conforme se concluiu no ensaio de permeabilidade. Existe assim, um maior risco de saturação da mistura M em condições reais de utilização. A facilidade com que se saturam os blocos da mistura M não é apenas prejudicial em termos de durabilidade do bloco, mas também no que se refere à sua capacidade de isolamento térmico e resistência mecânica. Conclui-se assim que a capacidade de transporte de água da mistura M é superior à da mistura C, traduzindo-se numa menor durabilidade. A diferença entre as absorções de água por capilaridade (A') das duas misturas M e C, traduz melhor a diferença registada entre as resistências à compressão das duas misturas, do que a diferença entre as absorções de água por imersão (A). Deste modo, conclui-se, que o ensaio de absorção de água por capilaridade é um melhor indicador da qualidade dos BTC, do que o ensaio de absorção de água por imersão.

4.8.4. Erosão por gotejamento (drip test)

Neste ponto do trabalho caracteriza-se a erosão dos BTC por gotejamento, nomeadamente a sua profundidade de erosão e penetração de humidade. O gotejamento de água simula o efeito de chuva leve sobre os BTC. São analisadas as consequências do gotejamento de água sobre a face dos provetes e classificam-se os BTC de acordo com a norma NZS 4298 (1998).

As composições estabilizadas M e C não registraram qualquer dano por erosão com o gotejamento da água. Assim, na Tabela 36 apresentam-se apenas os resultados do ensaio referentes à composição não estabilizada N. No trabalho de Cid-Falceto (2012), as suas composições estabilizadas também não apresentaram qualquer dano, pelo que se conclui que o ensaio de erosão por gotejamento é apenas adequado para misturas não estabilizadas.

Na Tabela 36 apresenta-se, para além dos resultados obtidos, a classificação dos provetes segundo a Norma NZS 4298 (1998). Conclui-se assim que a mistura N apresenta, em média uma profundidade de erosão (P.E.) de 4,3 mm, pelo que possui um índice de erosão de 2. Tendo um índice menor que 5, a mistura N tem durabilidade aceitável segundo a norma mencionada. No que se refere à profundidade de penetração de humidade (P.P.H.), a mistura N apresenta, em média, uma profundidade de 57,7 mm, pelo que a mesma é aprovada segundo a norma mencionada (menor que 120 mm). Em suma, conclui-se que as composições estabilizadas não são afetadas pela ação de gotejamento e a mistura N tem uma durabilidade aceitável segundo a norma NZS 4298 (1998).

Tabela 36 - Resultados do ensaio de erosão por gotejamento, mistura N (3.7.3.4)

Provete	Tempo (min)	P. E. (mm)	Índice de erosão	P.P.H (mm)	Índice de Penetração
N45	48	3	2	52	Aprovado
N45*	47	2	2	54	
N48	51	5	3	53	Aprovado
N48*	55	6	3	60	
N55	56	5	3	61	Aprovado
N55*	50	5	3	66	

Legenda: P.E: profundidade de erosão, P.P.H: profundidade de penetração da humidade

Toda a área da face dos provetes abaixo da zona de impacto direto das gotas de água foi amolecida pela escorrência da água. Esta zona, devido à facilidade de desagregação da composição não estabilizada, ficou extremamente suscetível a danos superficiais, como por exemplo a remoção de material durante o seu manuseamento. O corte, para a medição da profundidade de penetração da humidade, foi realizado manualmente, necessitando de pouca esforço para seccionar a zona húmida dos provetes. Demonstra-se assim, mais uma vez, que a resistência da composição não estabilizada é muito prejudicada pela ação da água. Deste modo, conclui-se que apesar do impacto direto das gotas não criar grandes danos nos blocos, deixa-os mais suscetíveis a desagregação superficial. Como em condições reais de chuva não incide apenas uma gota sobre a face dos blocos, é provável que os blocos não estabilizados perdessem uma quantidade apreciável de material nessas condições. Na Figura 65 é indicado o efeito do gotejamento de água sobre as faces da mistura N, bem como as restantes características mencionadas acima.

Conforme mencionado em 2.8.3, são inúmeras as incertezas associadas aos ensaios de durabilidade, e as normas internacionais que regem as mesmas apresentam critérios de classificação bastante variáveis entre si. Considera-se que a classificação da norma NZS 4298 (1998) é pouco exigente visto que a mistura N torna-se suscetível a danos superficiais quando humedecido pela escorrência das gotas.



Figura 65 - Efeito do gotejamento nos blocos da mistura N

Apenas Silva et al. (2013) recorreram à mesma norma utilizada no presente trabalho, embora tenham analisado cubos de taipa não estabilizados. No entanto, de acordo com o referido no Capítulo 2, os solos utilizados na taipa diferem pouco dos solos dos BTC pelo que se pode estabelecer uma comparação aproximada dos resultados de Silva et al. (2013) com os resultados obtidos no presente trabalho. Silva et al. (2013) utilizaram um solo classificado como uma areia argilosa, com um índice de plasticidade de 11, obtendo-se uma profundidade de erosão média de 3 mm e uma profundidade de penetração de humidade média de 20 mm (Tabela 12). O seu índice de erosão é o mesmo que o da mistura N, isto é de 2. No entanto, a sua profundidade de penetração de humidade é muito inferior. Assume-se assim que a porosidade dos cubos de Silva et al. (2013) fosse inferior, devido à maior compactação do solo atingida na construção em taipa do que nos BTC. A maior profundidade de penetração de humidade da mistura N, demonstra mais uma vez que esta composição é muito pouco durável face à ação da água. A comparação direta com os trabalhos de Cid-Falceto (2012) e Galíndez (2009) (Tabela 12) têm pouco significado pois os mesmos utilizaram alturas de queda de água muito superiores, e conforme o referido por Heathcote (1995), o mecanismo principal de erosão nos BTC é a libertação de energia cinética pelo impacto das gotas de água, o que depende, entre outros fatores, da altura de queda da mesma. Contudo, conforme referido nos ensaios de absorção de água, os BTC ensaiados por Cid-Falceto (2012) apresentaram uma porosidade superficial baixa, e portanto uma resistência superficial elevada. Os mesmos foram sujeitos a um fio de água com uma altura de queda muito superior e no entanto apresentaram profundidades de erosão apenas ligeiramente superiores às da mistura N.

4.8.5. Erosão acelerada (spray test)

Neste ponto caracteriza-se a erosão dos BTC por impacto de um jacto de água, nomeadamente a sua profundidade de erosão e penetração de humidade. O jacto de água simula o

efeito de chuva intensa, como por exemplo, chuva batida pelo vento. Analisam-se as consequências do impacto do jacto de água sobre a face dos provetes e classificam-se os BTC segundo a norma NZS 4298 (1998).

Seguindo o especificado na norma NZS 4298 (1998), a erosão causada nas composições estabilizadas foi desprezável, ao passo que todos os provetes da composição não estabilizada atingiram a rotura em poucos minutos (Figura 67). Desta forma, separa-se a análise dos resultados entre as composições estabilizadas e a composição não estabilizada.

De modo a centrar os provetes no equipamento de ensaio (3.7.3.4.1) foi necessário traçar, com um marcador, o seu centro. Esta marcação acabou por servir como forma de avaliação da erosão dos blocos das composições estabilizadas. As misturas C e M não apresentaram uma profundidade de erosão mensurável, existindo apenas a perda de pequenas partículas de agregado reciclado (diâmetro inferior a 2 mm) na superfície dos blocos. Apesar de pouco significativa, a perda de partículas foi ligeiramente menor na mistura C (Figura 66). O início da perda de material na mistura C ocorreu entre os intervalos de medição de 30 a 45 minutos, e na mistura M entre os intervalos de medição de 15 a 30 minutos. A mistura M demonstra assim, qualitativamente, uma menor dureza superficial do que a mistura C, o que está de acordo com as diferenças verificadas na sua resistência mecânica. Não se considera que estas misturas tenham perdido o seu acabamento liso, pois as linhas de marcação do centro dos provetes encontravam-se intactas após uma hora de ensaio. O valor médio da profundidade de penetração de humidade foi de 4 mm na mistura C e de 5,7 mm na mistura M. A maior profundidade de penetração da mistura M resulta, conforme referido no ensaio de erosão por gotejamento, da sua maior porosidade e da sua maior capacidade de absorção capilar. De acordo com a classificação da norma NZS 4298 (1998), as misturas estabilizadas são consideradas aptas para a aplicação em obra e considera-se que têm uma boa durabilidade face à erosão por ação de chuva intensa.

As conclusões anteriores provêm da realização do ensaio com uma pressão de 50 kPa. No entanto, como referido por Heathcote (1995) e Obonyo et al. (2010), existem muitas incertezas associadas a este ensaio, nomeadamente na forma em como pode ser representativo das condições reais. De modo a melhorar a caracterização das composições estabilizadas em termos de erosão acelerada, aumentou-se a pressão do jacto de água para cerca de 300 kPa (pressão média da rede pública de Lisboa). Porém, as composições estabilizadas, mais uma vez, não apresentaram uma erosão mensurável (Figura 66) deste modo têm um índice de erosão 1. Registou-se, da mesma forma, a perda de pequenas partículas do agregado reciclado, diferenciando-se apenas no período de tempo necessário até ao início do registo da perda de material. A perda de material teve início nos primeiros 15 minutos de medição em ambas as composições C e M. A quantidade de partículas destacadas foi superior, mas as marcações dos centros dos provetes mantiveram-se intactas. Considera-se que o acabamento se manteve liso, mas a maior perda de partículas resultou numa maior porosidade superficial, o que poderá facilitar o transporte de água para o interior dos blocos.

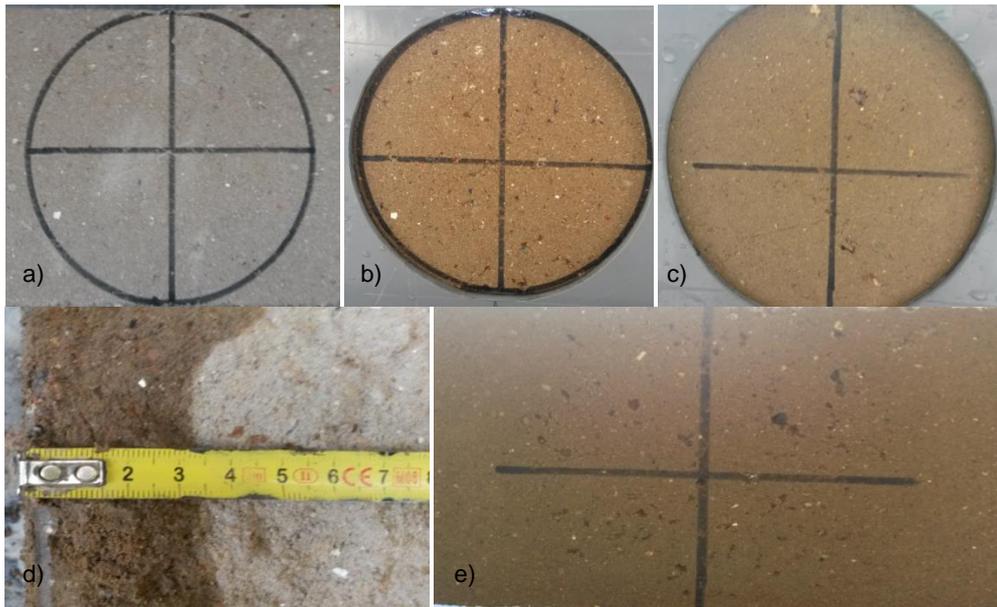


Figura 66 – Erosão acelerada - misturas estabilizadas: a) Mistura M antes do ensaio; b) Mistura M após o ensaio; c) Mistura C após o ensaio; d) Medição da profundidade de penetração de humidade na mistura C; e) Mistura M após ensaio com pressão de água superior.

A resistência à erosão por ação do jato de água, nas condições da norma NZS 4298 (1998), foi praticamente nula na mistura não estabilizada (Figura 67). De acordo com a classificação da norma, a mistura N deve ser rejeitada, pois apresenta um índice de erodibilidade de 5. Todos os provetes da mistura N atingiram a rotura num tempo médio inferior a 4 minutos (Tabela 37). Dada a sua facilidade de desagregação em contacto com a água, no instante do impacto com o jacto de água, os provetes da mistura N apresentaram rapidamente desgaste superficial e perda de material significativos. Assim, de modo a quantificar a erosão sofrida pelos provetes da mistura N, alterou-se os intervalos de medição para 1 e 3 minutos. As profundidades de erosão dos provetes não estabilizados apresentam-se na Tabela 37.

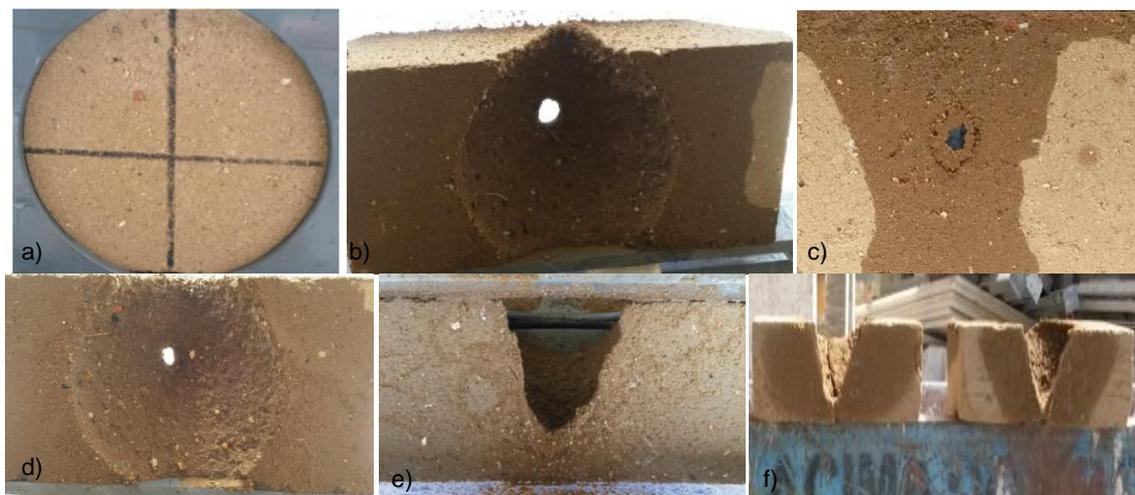


Figura 67 – Erosão acelerada - mistura não estabilizada: a) Mistura N antes do ensaio; b) Mistura N após rotura (Vista frontal); c) Mistura N após rotura (Vista posterior); d) Mistura N após rotura (Vista frontal); e) Mistura N após rotura (Vista superior); f) Provetes da mistura N após ensaio.

Tabela 37 - Resultados do ensaio de erosão acelerada, mistura N.

Provete	Profundidade Erosão (mm)		Rotura	Pressão (Kpa)	Classificação
	1 Minuto	3 Minuto			
17	55	80	3'18'	50	Rejeitado
38	45	65	4'19"		Rejeitado
52	45	70	3'35"		Rejeitado

Na Tabela 13 apresentam-se as profundidades de erosão reportadas por outros autores na literatura consultada, tendo em conta ensaios semelhantes de erosão acelerada. Os resultados obtidos no presente trabalho estão de acordo com os valores reportados, confirmando-se a boa durabilidade das composições estabilizadas C e M. Cid-Falceto (2012) fez a comparação entre o procedimento de ensaio da norma NZS 4298 (1998), com o de outra norma Espanhola específica para BTC, considerada mais agressiva (maior pressão e menor distância de impacto do jacto de água). No entanto, Cid-Falceto (2012) obteve resultados semelhantes em ambos os ensaios, tendo reportado valores idênticos aos do presente trabalho. Os blocos estudados por Cid-Falcet, (2012), conforme referido, foram produzidos com maior pressão de compactação pelo que, esperava-se, que a sua resistência à erosão fosse maior. A composição estabilizada com cimento de Cid-Falceto (2012), não sofreu qualquer erosão, tal como a mistura C, e a sua composição não estabilizada teve um comportamento idêntico ao da mistura N, tendo-se atingido a rotura em todos os provetes desta composição. Confirma-se assim que os BTC não estabilizados não apresentam adequada resistência à ação de chuva intensa. Rix (1998) recorreu à norma Australiana ("Bulletin 5"), para a realização do seu ensaio, que difere apenas da norma NZS 4298 (1998), na maior pressão do jacto de água em cerca de 70 kPa. Rix (1998) não realizou o ensaio em composições que fossem comparáveis com a das misturas C e N. No entanto, ensaiou várias misturas semelhantes à mistura M. Para uma composição com 4% de cal e 6% de cimento, Rix (1998) obteve uma profundidade de erosão de 15 mm após uma hora de ensaio, apresentando assim um índice de erosão de 1 tal como a mistura M, pelo que apresentam uma boa durabilidade. Esperava-se que esta composição, por apresentar uma proporção de cimento ligeiramente superior à composição M, não sofresse qualquer dano. Porém, conforme referido em 4.2.3.1, Rix (1998) utilizou, em todas as misturas utilizadas, um solo com características diferentes dos sugeridos para a produção de BTC em todas as suas misturas, sendo a única referencia na literatura consultada que documenta a desagregação dos seus BTC estabilizados com cal, quando submersos em água. Outros autores que estudaram este tipo de composição foram Hossain et al. (2007), Namango (2006) e Riza et al. (2011). A composição de Rix (1998) estabilizada apenas com cal atingiu a rotura no ensaio de erosão acelerada.

Tal como no presente trabalho, Exelbirt (2011), também utilizou pressões de água superiores aos da norma NZS 4298 (1998) para as composições estabilizadas. A distância de impacto foi semelhante ao utilizado no presente trabalho, embora a pressão de água tenha sido superior. A pressão de água utilizada por Exelbirt (2011) foi cerca de 4000 kPa. No entanto, para uma composição estabilizada com 7% de cimento, obteve uma profundidade de erosão desprezável (<1 mm/h), tal como ocorreu com a mistura C. Para uma composição de 7% de cal e 5% de cimento, Exelbirt (2011) obteve um índice de erodibilidade de 2, associado a uma profundidade de erosão de

25 mm/h, considerando-se, ainda assim, aceitável segundo a norma NZS 4298 (1998). Deste modo, confirma-se que, mesmo para condições mais agressivas, as composições semelhantes à mistura M revelam adequada durabilidade.

Em suma, as composições estabilizadas, C e M, apresentaram uma boa durabilidade face à ação da chuva intensa, ao passo que a composição não estabilizada (N), não resistiu a esta ação. Conclui-se que a estabilização dos BTC é essencial para garantir uma durabilidade aceitável dos BTC, e que para este efeito, tanto a composição com 4% de cal e 4% de cimento, como a composição com 8% de cimento, apresentam adequadas durabilidades. Sustenta-se o facto, de conforme afirmado por Exelbirt (2011) e Heathcote (2002), a avaliação experimental da durabilidade dos BTC subestimar a sua durabilidade em condições reais de serviço.

4.8.6. Outros indicadores de durabilidade

No presente ponto, avalia-se a capacidade de outros indicadores na avaliação da durabilidade, nomeadamente a resistência à compressão, a massa volúmica e a razão entre as resistências à compressão seca e saturada dos BTC.

Verificou-se que a resistência à compressão e a massa volúmica variam de forma proporcional. A mistura C é a mais resistente e com maior massa volúmica; a mistura N é a menos resistente e com menor massa volúmica. A mistura M tem uma resistência intermédia às restantes misturas, embora a sua massa volúmica seja muito semelhante à da mistura N. Resumidamente, de acordo com os resultados dos ensaios de durabilidade referentes ao comportamento dos BTC face à água, a mistura C possui uma capacidade de absorção e transporte mais reduzida e a resistência à erosão mais elevada. A mistura M possui maior capacidade de absorção e transporte e menor resistência à erosão do que a mistura C. A mistura N desagrega-se em contacto com a água, pelo que não apresenta qualquer resistência à ação da água.

Assim, tendo em conta as misturas produzidas, a resistência à compressão foi um adequado indicador da durabilidade dos BTC. Por sua vez, a massa volúmica não traduziu de forma razoável as diferenças de durabilidade das misturas M e N. Deste modo, considera-se que a massa volúmica não foi um bom indicador da durabilidade dos BTC, uma vez que é afetado por outros fatores, como o teor de humidade dos BTC, que afeta de forma inversa a massa volúmica e a durabilidade.

Heathcote (1995), defende que a relação entre as resistências à compressão nos estados secos e saturados é um melhor indicador da durabilidade dos blocos, do que apenas a resistência à compressão. Heathcote (1995) sugere um intervalo de valores para a razão entre as resistências saturada e seca dos BTC que deverá garantir uma durabilidade adequada dos mesmos. O intervalo de valores mencionado varia entre 0.33 a 0.50. Na Tabela 38 apresentam-se a razão entre as resistências à compressão saturada ($f_{cm,st}$) e seca ($f_{cm,sc}$) das misturas produzidas, bem como o de algumas misturas reportadas na literatura consultada.

Tabela 38 - Resistência à compressão como indicador de durabilidade dos BTC

Documento consultado	Composição	$f_{cm,st}/f_{cm,sc}$	Durabilidade
-	C (8% Cimento)	0.42	Aceitável
-	M (4% Cal + 4% Cimento)	0.33	Aceitável
Walker, (1995)	Cimento (10%)	0.53	Aceitável
Kerali, (2001)	Cimento (9%)	0.68	Superior
Bahar et al., (2004)	Cimento (10%)	0.49	Aceitável

As misturas C e M apresentam durabilidades aceitáveis segundo os limites definidos por Heathcote (1995) (Tabela 38). Como a mistura N desagrega-se em contacto com a água, não foi possível estimar a sua durabilidade pela razão entre as suas resistências à compressão nos dois estados mencionados. Em comparação com os autores Walker,(1995), Kerali (2001) e Bahar et al (2004), a mistura C tem uma durabilidade ligeiramente inferior à das composições equiparáveis dos mesmos autores. Contudo todos utilizam uma proporção de cimento superior à adotada no presente estudo. Confirma-se, mais uma vez, a influência na qualidade dos BTC da pressão de compactação durante a moldagem, pois Kerali (2001) produziu os seus blocos com uma pressão de compactação maior que os restantes autores mencionados acima e maior do que a pressão utilizada nos blocos produzidos (6 MPa), obtendo uma razão entre as resistências à compressão muito superior aos limites definidos por Heathcote (1995). Na bibliografia consultada, não se encontraram valores comparáveis com os da mistura M. Contudo, segundo o intervalo definido por Heathcote (1995), esta mistura apresenta uma durabilidade aceitável (limite inferior). Por se considerar que as misturas C e M apresentam uma boa durabilidade face á erosão por ação da água (4.2.6.5), e apresentam uma capacidade de transporte e de absorção de água semelhantes aos reportados por outros autores (4.2.6.3.), que os limites definidos por Heathcote (1995) são adequados para a avaliação da durabilidade dos BTC.

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

O presente trabalho consistiu na caracterização das principais propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade de blocos de terra compactada com e sem estabilização por materiais cimentícios.

Na presente secção resumem-se as principais conclusões referentes à análise e interpretação dos resultados obtidos ao longo da extensa campanha experimental efetuada, sobretudo no que se refere às características da terra selecionada, o comportamento físico e mecânico dos blocos de terra produzidos, as suas principais propriedades de transporte e o seu desempenho em termos de durabilidade à água. Finalmente, são apresentadas algumas propostas de desenvolvimento futuro com vista a consolidar o conhecimento no domínio dos blocos de terra como material de construção.

5.2. Conclusões gerais

O presente subcapítulo encontra-se organizado em duas partes. Em primeiro lugar, são abordadas as propriedades relativas aos materiais utilizados na produção dos blocos. De seguida resumem-se as principais conclusões obtidas na caracterização dos blocos de terra produzidos, que consistiu no principal objetivo do presente trabalho.

5.2.1. Propriedades gerais dos materiais constituintes

Após um extenso trabalho preparatório, procedeu-se à seleção dos materiais a utilizar na produção dos BTC, tendo em consideração 3 tipos de terra existentes nas imediações do local de fabrico dos blocos. A terra selecionada (TN) foi uma areia argilosa constituída por 3,4% de seixo, 61,2% de areia e 35,4% de argila e silte, segundo a classificação da especificação LNEC E-293 (1970). A TN foi corrigida granulometricamente com a incorporação de 15%, em massa, de um agregado reciclado (R) resultante da demolição de várias obras. O R tinha partículas finas, com diâmetro inferior a 2 mm, sendo essencialmente composto por betão, tijolo cerâmico e argamassas cimentícias. A mistura de terra com agregado reciclado (TNR) apresentou boa coesão pois os blocos da composição não estabilizada apresentaram resistência mecânica semelhante ao reportado por outros autores na literatura consultada.

A TN apresentou um limite de liquidez (LL) de 18 e um índice de plasticidade (IP) de 3, pelo que era pouco plástica, traduzindo-se na desagregação dos blocos da mistura não estabilizada (N) quando em contacto com a água. A TN caracteriza-se por apresentar uma massa volúmica seca de cerca de 2665 Kg/m³ e aproximadamente 1,87% (em massa) de matéria orgânica. O teor ótimo em água (TOA) da TN foi de 11,7%, obtendo-se para este nível uma massa volúmica seca de cerca de

1929 Kg/m³, tendo em conta a pressão de compactação leve do ensaio de Proctor, realizado segundo a norma D698 (2000).

5.2.2. Propriedades gerais dos BTC

No estado fresco, os BTC apresentaram massas volúmicas compreendidas entre 1900 e 2000 Kg/m³, sugerindo uma boa compactação na produção dos mesmos. O teor em água utilizado na produção dos BTC foi cerca de 10% em relação à massa da mistura seca, sendo ligeiramente inferior ao TOA determinado no ensaio de compactação da TN. A estimativa do teor em água teve em consideração o módulo expedito do ensaio “drop test”.

A caracterização dos betões no estado endurecido envolveu a realização de ensaios de caracterização física, mecânica e de durabilidade dos BTC.

Os blocos da mistura N perderam as suas características de coesão em contacto com a água, pelo que se aconselha a sua utilização apenas em ambientes secos sem possibilidade de contacto prolongado com a água. Os blocos estabilizados, C e M, mantiveram a coesão em água (pelo menos durante 72 horas) e apresentaram uma resistência média à compressão no estado saturado (duas horas de submersão em água) de cerca de 2,24 e 1,05 MPa, respetivamente. Os blocos C seriam aceites, segundo as especificações da norma NBR 8492 (1984), no entanto, os blocos N e M seriam rejeitados. No estado seco, os blocos C, M e N, apresentaram resistências à compressão aos 28 dias de idade de cerca de 5,37, 3,14 e 2,37 MPa, respetivamente. A resistência seca, dos blocos N, resulta do poder de coesão da fração de silte/argila presente no solo, pelo que, podem existir grandes diferenças face a outras composições não estabilizadas. Segundo o especificado na norma NTC 5342 (2004), os blocos C, M e N seriam classificados como BSC P 40 H, BSC P 20 H e BSC O 20 S, respetivamente. Em qualquer das misturas, a resistência mecânica foi sensível à variação do teor de humidade, dado que interfere nas características de coesão da fração de solo e no desenvolvimento da resistência da cal. Constatou-se que à medida que o teor de humidade aumenta, a diferença de resistência entre as diferentes misturas também aumenta. Tal resulta das misturas com ligante hidráulico serem menos prejudicadas com o aumento do teor em água. O incremento de resistência obtido nas misturas estabilizadas e sobretudo a capacidade de se manter estável, mesmo em situação extrema de contacto direto com a água, justifica a opção de se proceder à estabilização dos BTC. Em face do aumento importante de resistência verificada entre as misturas com 4 e 8% de cimento, independentemente do teor de humidade, e tendo em consideração apenas critérios de eficiência estrutural (resistência versus massa volúmica,) pode justificar a opção de utilizar maiores dosagens de cimento na estabilização dos blocos. Como seria esperado, a cal não contribui de forma relevante para a resistência, nomeadamente em idades jovens em que as reações associadas ao seu endurecimento são pouco significativas. Mesmo nas misturas não estabilizadas, a resistência dos BTC evoluiu no tempo em resultado do ganho de coesão da fração silte/argila por redução no teor de humidade dos provetes. Os blocos C apresentaram uma taxa de evolução ligeiramente superior à dos restantes blocos uma vez que são beneficiados pela hidratação do cimento. Concluiu-se ainda que a elevada variação de resistência que pode ocorrer nos blocos devido a variações do teor de humidade,

mesmo nos blocos estabilizados, obriga a que seja necessário considerar coeficientes bastante penalizadores no seu dimensionamento. No presente trabalho sugerem-se fatores de 0,55 e 0,44 para as misturas só com cimento ou cimento e cal, respetivamente, tendo como referência às condições de humidade laboratoriais.

As massas volúmicas dos BTC no estado endurecido variaram, no geral, entre 1700 a 2000 Kg/m³. A massa volúmica, ao depender do tipo e proporção dos constituintes da mistura, pode apresentar valores muito diferentes dos referidos em outros trabalhos de investigação. A partir da massa volúmica dos betões no estado fresco e endurecido procedeu-se à estimativa da porosidade dos blocos, confirmando-se que a estabilização dos BTC, sobretudo com cimento, é vantajosa no aumento da sua compacidade. As porosidades dos blocos variaram entre cerca de 30 a 34%, ocorrendo uma redução para nos blocos estabilizados no estado endurecido, influenciada pela relação a/c e o grau de hidratação do cimento. Concluiu-se, no entanto, que apesar da redução da porosidade com a estabilização dos BTC, o principal fator que afeta a porosidade dos blocos é a qualidade do processo de produção dos mesmos, nomeadamente a pressão de compactação durante a moldagem dos blocos. O ligante atua essencialmente com o objetivo de solidarizar os grãos entre si, tendo uma menor influencia na porosidade global dos BTC, sobretudo no estado fresco.

Constatou-se que pequenas variações em torno de 30% de porosidade, como é o caso entre nos blocos C e M (cerca de 3% de diferença de porosidade), conduzem a aumentos exponenciais de permeabilidade, pelo que nos blocos M apresentam uma permeabilidade 3 vezes superior aos blocos C. Foi impossível determinar a permeabilidade nos blocos N, pois os provetes tiveram que ser ensaiados em condições saturadas, para as quais ocorre desagregação dos blocos.

Em termos médios verificou-se que devido ao teor de humidade, a massa volúmica dos BTC aumentou até cerca de 11% a 13% do estado seco para o saturado, devendo-se ter em atenção esta variação no dimensionamento estrutural. No entanto, o teor de humidade tem um maior impacto na resistência à compressão do que na massa volúmica. Em termos percentuais, a diminuição da resistência é aproximadamente 10 vezes superior ao aumento da massa volúmica, devido ao aumento do teor de humidade, pelo que a análise da eficiência estrutural dá uma melhor ideia da potencialidade deste material em soluções estruturais.

A resistência à tração dos BTC foi, em geral pouco significativa, apresentando valores de cerca de 0,1 a 1,2 MPa, dependendo da composição e tipo de ensaio. De referir, que, dado os valores serem muito baixos, em especial nas misturas não estabilizadas, a precisão dos resultados é reduzida, o que dificultou a interpretação dos resultados dos ensaios. Verificou-se que a resistência à flexão nos blocos C, M e N foi cerca de 28%, 29% e 18% da resistência à compressão, respetivamente, tendo em conta os blocos condicionados em ambiente de laboratório. Por sua vez, a resistência à tração por compressão diametral foi cerca de 15%, 9% e 6% da resistência à compressão, para os blocos C, M e N respetivamente. Verificou-se um comportamento semelhante entre a resistência à tração e à compressão no que se refere à influência da estabilização dos blocos e à influência do teor de humidade de ensaio. No entanto, no ensaio de tração por compressão

diametral ocorreu um aumento da resistência à tração dos blocos com o incremento do teor de humidade. Estima-se que este fenómeno se deveu ao conjunto de dois fatores: a elevada proximidade dos resultados obtidos aliado à reduzida precisão dos resultados; o desenvolvimento de gradientes de humidade nos provetes condicionados em ambiente de laboratório.

Verifica-se uma adequada correlação entre a resistência à compressão e à tração, dado que ambas as propriedades são essencialmente afetadas pelos mesmos fatores, isto é, a porosidade e coesão entre partículas dos blocos. Deste modo, concluiu-se que a utilização do ensaio de tração por flexão é um bom indicador da qualidade de um bloco na fase de produção, nomeadamente na inexistência de equipamento para se proceder ao ensaio de compressão. Contudo é necessário ter em conta que, conforme verificado no presente trabalho, o ensaio de flexão tende a sobrestimar a resistência à tração. Por outro lado, a relação entre a resistência à compressão e à tração tende a diminuir com o aumento do teor de humidade, pois a influência da humidade na resistência à tração por flexão dos BTC tende a ser mais prejudicial do que na sua resistência à compressão, devido a efeitos relacionados com a geração de gradientes de humidade na espessura dos provetes.

Concluiu-se, que o ensaio não destrutivo de medição da velocidade de ultrassons, poderá ser utilizado como critério de avaliação qualitativa dos BTC, dado se ter verificado uma adequada relação entre a velocidade de de ultrassons e a resistência à compressão ou a massa volúmica, para um dado teor de humidade. Deste modo, a velocidade de propagação de ultrassons foi maior nos blocos estabilizados, sendo a mais elevada nos blocos C. No geral, a velocidade de propagação de ultrassons dos BTC variou desde 950 a 2000 m/s, dependendo da composição e teor de humidade. De acordo com a classificação do IAEA (2002), os BTC classificar-se-iam como sendo “betões muito fracos”.

O coeficiente de condutibilidade térmica dos BTC variou, no geral entre cerca de 0,6 a 1,5 W/mk dependendo da composição e, sobretudo, do teor de humidade dos blocos. De facto, o teor de humidade teve uma influência significativa na condutibilidade térmica dos BTC, podendo aumentar 2 a 2,5 vezes entre as condições secas e saturadas. A composição dos blocos teve menor influência, sobretudo quando os blocos não foram afetados por diferenças de humidade (estado seco). A utilização de blocos não estabilizados, foi a melhor solução em termos de conforto térmico, apresentando, em média, uma condutibilidade térmica 8% menor que nos blocos estabilizados no estado seco e até 33% menor em ambientes húmidos. No entanto, estes BTC só deverão ser utilizados em regiões secas devido à sua desagregação em contacto com a água. Verificou-se ainda que os blocos C apresentaram maior condutibilidade térmica que os blocos M em condições de teor de humidade baixa, no entanto, a situação inverte-se quando os blocos se encontram em condições húmidas devido à maior porosidade e permeabilidade dos blocos M.

No que se refere à durabilidade dos BTC concluiu-se que a estabilização dos BTC é essencial para condições em que seja expectável que os BTC entrem em contacto com a água. Os blocos estabilizados apresentaram menor poder de absorção e transporte de água e maior resistência à erosão por ação da água do que os blocos não estabilizados. Concluiu-se que os blocos N são

inadequadas para a utilização em meios onde seja previsível qualquer contacto direto com a água. Verificou-se que os blocos C possuem uma capacidade de absorção e transporte mais reduzida do que os blocos M, obtendo-se absorções de água de cerca de 13,6 e 16,5%, respetivamente, e coeficientes de absorção de água por capilaridade de 20,8 e 29,8 g/cm²min^{1/2}, respetivamente. Concluiu-se ainda, que o ensaio de absorção de água por capilaridade é um melhor indicador da qualidade dos BTC do que o ensaio de absorção de água por imersão, que apenas avalia a porosidade aberta acessível à água. Verificou-se que, segundo as especificações da norma NBR 8492 (1984) e NTC 5324 (2004), os blocos C e M são aptas para serem utilizadas em ambientes húmidos. Segundo as especificações da norma NTC 5324 (2004) os blocos C e M classificam-se como sendo de fraca absorção capilar, e de reduzida absorção capilar, respetivamente e os blocos N classificam-se como sendo de “aplicação em meio seco”.

Concluiu-se, dos ensaios de erosão acelerada, que os blocos estabilizados apresentam boa durabilidade e que os blocos não estabilizados apresentam uma resistência à erosão praticamente nula. Segundo o especificado na norma NZS 4298 (1998), a erosão acelerada, que simula chuva de elevada intensidade, foi desprezável nos blocos estabilizados, apresentando um índice de erosão 1 em ambos os casos, ao passo que todos os blocos não estabilizados atingiram a rotura em poucos minutos. Concluiu-se que nos blocos C têm uma durabilidade superior aos blocos M, apresentando maior dureza superficial e muito menor capacidade de transporte de água, devido à utilização exclusiva do cimento como estabilizador dos BTC.

Constata-se que os blocos estabilizados não são afetados pela ação de gotejamento, que simula chuva de fraca intensidade, e os blocos N têm uma durabilidade aceitável segundo a norma NZS 4298 (1998). De acordo com o especificado na norma NZS 4298 (1998), obteve-se um índice de erosão menor do que 5 para os blocos N, pelo que se considera que a avaliação da durabilidade dos BTC segundo esta norma, é pouco exigente em face do mau desempenho demonstrado pelos blocos N em contacto com a água.

Concluiu-se ainda que a relação entre as resistências à compressão nos estados secos e saturados é um bom indicador da durabilidade dos BTC, segundo os limites definidos por Heathcote (1995). Deste modo, é possível avaliar a durabilidade dos BTC, evitando a realização dos ensaios de durabilidade preconizados no presente trabalho.

Em resumo, no presente trabalho caracterizaram-se as principais propriedades mecânicas físicas e de durabilidade de BTC não estabilizados e estabilizados com materiais cimentícios. Concluiu-se que a estabilização dos BTC é vantajosa no que se refere à sua resistência mecânica e essencialmente no que se refere à sua durabilidade, sobretudo em condições em que seja previsível o seu contacto direto com a água. A estabilização dos BTC melhora algumas das suas propriedades físicas, como a sua porosidade aberta e a sua massa volúmica, sendo apenas ligeiramente prejudicial na capacidade de isolamento térmico. A estabilização dos BTC com cimento demonstrou ser a melhor solução, tendo em conta as várias propriedades estudadas no presente trabalho, evidenciando um desempenho bastante superior face à estabilização com uma mistura de cimento e

cal. No entanto, importa referir que os blocos com apenas 4% de cimento e 4% de cal foram igualmente capazes de apresentar elevada resistência à erosão por ação da água, mesmo perante a simulação de chuva intensa.

Em comparação com os resultados reportados por outros autores na bibliografia consultada, tendo em conta níveis de estabilização semelhantes aos adotados no presente trabalho, conclui-se que o processo de produção é um fator determinante para a obtenção de BTC com adequada qualidade. Destaca-se a pressão de compactação exercida na moldagem dos blocos, que influencia significativamente a resistência mecânica, a porosidade e as restantes propriedades físicas e de durabilidade, nomeadamente a capacidades de absorção, transporte e resistência à erosão pela água.

5.3. Propostas de desenvolvimento futuro

A realização do presente trabalho contribuiu para um aumento da potencialidade e desempenho dos blocos de terra compactados, como soluções construtivas mais sustentáveis e ambientalmente mais limpas. Contudo, o presente estudo é apenas uma pequena abordagem que deve ser complementada com outros trabalhos de investigação que visem um conhecimento mais aprofundado do comportamento deste material de construção. Como tal, para uma maior confiança na utilização de blocos de terra compactados, como solução construtiva, são sugeridos alguns temas de desenvolvimento futuro:

- Caracterização das propriedades mecânicas e de durabilidade de BTC estabilizados com diferentes tipos de estabilizadores, procedendo-se à otimização das proporções dos mesmos;
- Estudo da influência do processo de produção dos BTC, nomeadamente a influência da pressão de compactação e condições de cura;
- Análise da viabilidade económica da produção de BTC, tanto a nível nacional como global;
- Análise de sustentabilidade dos BTC, nomeadamente ao nível do consumo de energia e emissões de carbono na sua produção, sobretudo na produção industrializada dos mesmos;
- Estudo da eficiência de produtos hidrófugos no desempenho face à água de BTC com e sem estabilização;
- Caracterização de BTC em ambiente de exposição real, sobretudo na caracterização das propriedades de durabilidade dos mesmos;
- Análise do comportamento ao fogo, exposição a atmosferas extremas, ação de gelo-degelo, entre outras propriedades de durabilidade dos BTC;

- Análise estrutura e de durabilidade dos BTC quando integrados em elementos de alvenaria, simulando a sua aplicação em elementos reais;
- Criação de normas nacionais que regem a construção em terra, cujo conteúdo e especificações possam ser compatíveis com algumas normas internacionais, de modo a facilitar e disseminar a utilização das diferentes técnicas de construção em terra, sobretudo os BTC.

Referências Bibliográficas

- Adam, E. a. (2001). Compressed Stabilized earth Block Manufacturing in Sudan - UNESCO - Technical Note No. 12. *Organization*, 101.
- Adam et al., E. a. (1995). Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. *Building and Environment*, 30(2), 245–253. doi:10.1016/0360-1323(94)00041-P
- Arabani, M., & Karami, M. (2007). Geomechanical properties of lime stabilized clayey sands. *Arabian Journal for Science and Engineering.*, 32(1), 11–25. Retrieved from http://ajse.kfupm.edu.sa/articles/321B_P.02.pdf
- Araújo, J. M. De. (2001). A resistência à tração e energia de fratura do concreto. *Estruturas de Concreto*, (2), 27.
- Ashworth, T. (1991). Insulation Materials: Testing and Applications. *ASTM Special Technical Publication*, 1116.
- AVEI, A. E. I. (2014). Compressed Stabilised Earth Block. Retrieved from http://www.earth-auroville.com/compressed_stabilised_earth_block_en.php
- Bahar et al., R. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 811–820. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003
- Barbosa, N. P. (1996). Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional (Vol. 2).
- Bogas et al., J. A. (2014). Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1780–1791. doi:10.1007/s12205-014-0061-x
- Bogas, J. A. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados de argila expandida*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Tese de doutoramento.
- Burroughs, S. (2008). Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264–273. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(264)
- Cánovas et al., M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. *ACI Materials Journal*, 3.
- CDI and CRATerre-EAG/ODA. (1998). Compressed earth blocks standards, series technologies nr 11.
- Chan et al., C. (2010). Development of a Strength Prediction Model for “ Green ” Compressed Stabilised Earthbricks. *Journal of Sustainable Development*, 3(3), 140–150.
- Cid-falceto et al., J. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de La Construcción*, 63, 159–169. doi:10.3989/ic.10.011
- Cid-falceto et al., J. (2012). Approximation to earth material from international normative. Madrid: Universidade Politecnica de Madrid. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Cid-Falceto, J. (2012). *Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción*. Universidade Politecnica de Madrid. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

- Costa et al., A. (2002). Estruturas de Betão I: Parte 2 - Materiais. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.
- CRATerre, Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre. AnArchitecture*.
- Delgado et al., M. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21, 237–251. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006
- Dreux et al., G. (2002). Nouveau Guide du béton et de ses constituants. *Eyrolles*.
- Elenga, R. G. (2011). Characterization of Clayey Soils from Congo and Physical Properties of Their Compressed Earth Blocks Reinforced with Post-Consumer Plastic Wastes. *Geomaterials*, 01(October), 88–94. doi:10.4236/gm.2011.13013
- Eusébio, A. P. (2001). *Reabilitação e melhoramento de paredes de terra crua - Taipa*. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico.
- Exelbirt, J. (2011). *Characterizing Compressed Earth Bricks Based on Hygrothermal Aging and Wind-Driven Rain Erosion*.
- Font, J. (2005). Construção de terra em Espanha e Portugal - diferenças e semelhanças. In Arguentum (Ed.), *Arquitetura de Terra em Portugal* (primeira e, pp. 119–125).
- Galíndez, F. (2009). Compressed earth blocks (CEB) with no added cement Seguridad y Medio Ambiente - N° 115, 1–15.
- Geiger et al., O. (2010). Earthbagstructures.com. Retrieved from <http://www.earthbagstructures.com/basics/basics.htm>
- Geiger et al., O. (2014). Earthbagbuilding.com. Retrieved from <http://www.earthbagbuilding.com/projects/projects.htm>
- Gomes. P. (2005). Arqueologia da arquitectura de terra em Portugal. In Argumentum (Ed.), *Arquitetura de Terra em Portugal* (Primeira e, pp. 125–132).
- Gomes, C. F. (1988). *Argilas: o que são e para que servem*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.
- Heathcote, K. a. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185–189. doi:10.1016/0950-0618(95)00035-E
- Heathcote, K. a. (2002). An investigation into the erodibility of earth wall units. *Faculty of Design Architecture and Building. University of Technology Sydney*.
- Hossain et al., K. M. a. (2007). Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea. *Resources, Conservation and Recycling*, 51, 711–731. doi:10.1016/j.resconrec.2006.12.003
- Hossain et al., K. M. a. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495–3501. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042
- Hydraform. (2006). Manual Português Hydraform. *Hydraform,Lda*.
- IAEA. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. *Training Course Series*, 17(17), 231. Retrieved from http://200.10.161.33/cirsoc/pdf/ensayos/tcs-17_web.pdf

- Inicia, L. (2012). *Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica.
- Kakizawa, Y. (2007). Concepts and Innovations Construction of a Three - Dimensional, *60*(April), 901–910. doi:10.1227/01.NEU.0000255422.86054.51
- Kerali, A. G. (2001). *Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks*. University of Warwick, School of Engineering.
- Krosnowski, A. D. (2011). *A Proposed Best Practice Method of Defining a Standard of Care for Stabilized Compressed Earthen Block Production*. University of Colorado.
- Little et al., B. (2001). *Building with earth in Scotland: Innovative Design and Sustainability*. Scottish Executive.
- Lourenço, P. (2002). *Construções em Terra*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- McGregor et al., F. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, *75*, 11–18. doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.009
- Medjo Eko et al., R. (2012). Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Construction and Building Materials*, *35*, 340–346. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050
- Mehta et al., P. K. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Concrete. doi:10.1036/0071462899
- Morel et al., J. C. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, *21*, 303–309. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021
- Motta, M. (1997). *Construções Rurais em Alvenaria de Terra Crua no Baixo Alentejo*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Muntohar, A. S. (2011). Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, *25*(11), 4215–4220. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061
- Namango, S. S. (2006). Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction : Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres , Cassava Powder and Cement Compositions . Supervision : Entwicllu.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (fourth an). Pearson Education Limited. doi:10.1016/0008-8846(96)82366-0
- Ngowi, A. B. (1997). Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*, *11*(1), 1–7. doi:10.1016/S0950-0618(97)00006-8
- Obonyo et al., E. (2010). Durability of compressed earth bricks: Assessing erosion resistance using the modified spray testing. *Sustainability*, *2*, 3639–3649. doi:10.3390/su2123639
- Ogunye et al., F. O. (2002). Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. *Construction and Building Materials*, *16*, 163–172. doi:10.1016/S0950-0618(02)00004-1
- Osula, D. O. a. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. *Engineering Geology*, *42*, 71–81. doi:10.1016/0013-7952(95)00067-4

- Ozkan et al. (1995). An experimental study of the critical properties of pressed and stabilised earth bricks. *Architectural Science Review*, 38.
- Pacheco-Torgal et al., F. (2009). *A construção em Terra*. (TecMinho, Ed.) (Primeiro). TecMinho.
- Pacheco-Torgal et al., F. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054
- Picorelli, L. (2011). No Title. Retrieved from <http://lecympicorelli-bioarquitetura.blogspot.pt/2011/06/construcao-de-terra-parte2-adobe.html#axzz3SkyeuZHO>
- Powers, T. C. (1958). Structure and physical properties of hardened portland cement pastes. *Journal of American Ceramic Society*, 41(nº1).
- Pundit. (1991). Pundit manual for use with the portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester.
- Rael, R. (2009). Earth Architecture, 208. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=BsLAeifqe4EC&pgis=1>
- Rigassi, V. (1985). *Compressed Earth Blocks : Manual of Production*. CRAterre-EAG, GATE (Vol. I).
- Rix, C. G. (1998). *Stabilisation of a highly plastic clay soil for the production of compressed earth blocks*. University of the Witwatersrand.
- Riza et al., F. V. (2010). A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). *CSSR 2010 - 2010 International Conference on Science and Social Research*, (Ccsr), 999–1004. doi:10.1109/CSSR.2010.5773936
- Riza, et al., F. V. (2011). Possibility of Lime as a Stabilizer in Compressed Earth Brick (CEB). *Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011*.
- Roberts-Wollmann et al. (2006). Bearing Strength of Lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, (103).
- Sampaio et al., S. (2014). Thermal conductivity of compressed earth blocks (CEB) with different insulating materials. *9th International Masonry Conference 2014 in Guimarães*, 1–12.
- Santos, J. A. (2008). Compactação Elementos Teóricos. *Obras Geotécnicas. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.
- Silva et al., R. A. (2013). Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*, 47, 181–191. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047
- Silveira et al, D. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28(1), 36–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046
- Swamy et al., R. N. (1983). Mix design and properties of concrete made from PFA course aggregates and sand. *International Journal of Cement Composites and Lightwieght Concrete*, 3, 263–27.
- Taallah et al., B. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161–168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058

- Trtnnik et al. (2008). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artific. neural networks. *Utrasonics, Article in Press*.
- UNESCO, W. H. C. 1992-2014. (2014). UNESCO World Heritage List. Retrieved April 20, 2006, from <http://whc.unesco.org/en/list/>
- Walker, P. (1995). Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks, *9465(95)*, 301–310. doi:10.1016/0958-9465(95)00019-9
- Waziri et al., B. S. (2013). Properties of Compressed Stabilized Earth Blocks (CSEB) For Low- Cost Housing Construction : A Preliminary Investigation Literature Review, *4(2)*, 39–46.
- Webodysseum. (2012). “City of Shibam.” Retrieved from <http://webodysseum.com/wp-content/uploads/2012/12/shibam-yemen-06.jpg>
- Wojciechowska, P. (2001). *Building with earth: a guide to flexible-form earthbag construction*. (I. Hartworks, Ed.). Chelsea Green Publishing Company.

Documentos Normativos

- ASTM: D698 (2000) – Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, ASTM, Pensilvania
- ISO/FDIS 10456 (2007) – Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, ISSO, Geneva
- LNEC E293 (1970) – Análise granulométrica do solo por peneiração húmida, Lisboa
- LNEC E394 (1993) – Absorção de água por imersão à pressão atmosférica, Lisboa
- NBR 8492 (1984) – Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água d tijolos maciços de solo-cimento para alvenaria, ABNT, Rio de Janeiro
- NP-83 (1965) - Solos: densidade de particulas, IPQ, Lisboa
- NP-143 (1969) – Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ, Lisboa
- NP EN 12390-6 (2011) – Ensaio do betão endurecido: resistência à tração por compressão de provetes, IPQ, Lisboa
- NP EN 772 – 6 (2002) – Métodos de ensaio de blocos para alvenaria: determinação da resistência à tração por flexão de blocos para alvenaria de betão de agregados, IPQ, Lisboa
- NP EN 12504-4 (2007) – Medição da velocidade de propagação dos ultrassons, IPQ, Lisboa
- NTC 5324 (2004) – Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especificacions. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega, ICONTEC, Bogotá
- NZS 4298 (1998) – Materials and workmanship for earth buildings, SNZ, Wellington

ANEXOS

ANEXO I

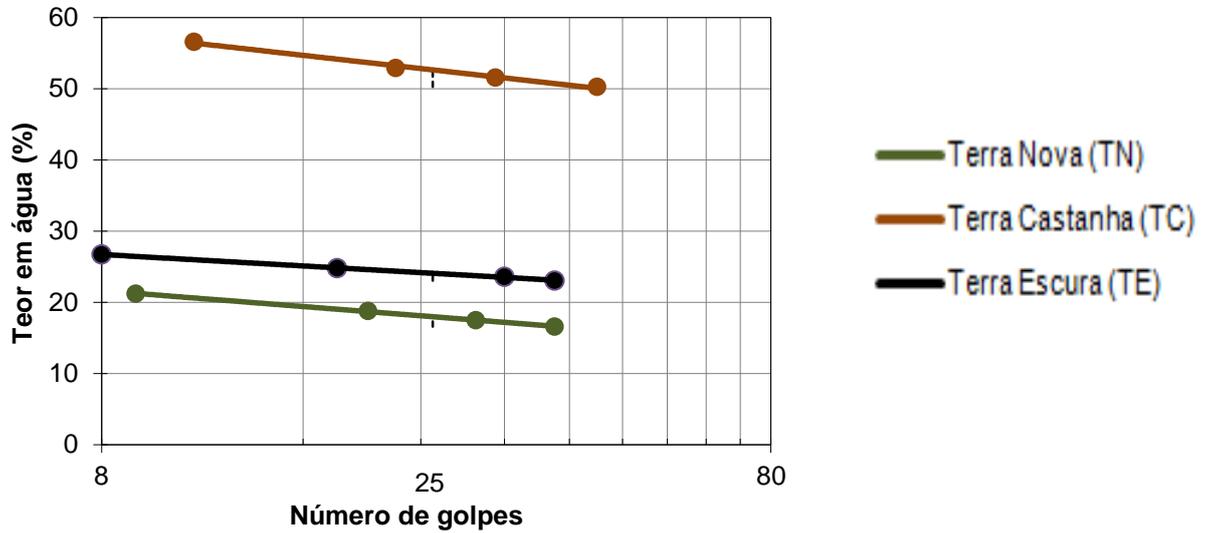
Anexo I.I - Informação complementar para os valores de resistência à compressão em BTC reportados por outros autores

Doc. Consultado	Tipo de solo	Provede ensaiado	P.C. (MPa)	Cura	Procedimento de ensaio	W (produção)
(Walker, 1995)	Areia do rio com 40% argila	Bloco inteiro (295*140*130 mm ³)	2-4	7 Dias húmido, 21 dias coberto	Bloco inteiro, posição de moldagem, 3,5MPa/min	TOA
(Ngowi, 1997)	Argiloso (37%, IP: 26)	Bloco inteiro (260*120*90 mm ³)	2	7 Dias húmido, 21 dias coberto	BS 5921	Drop test
(Kerali, 2001b)	Arenoso argiloso (23%)	Bloco inteiro (290*140*100 mm ³)	6	7 Dias húmido, 21 dias coberto	Cubo recortado do bloco (100*100*100 mm ³)	8.5%
(Krosnowski, 2011a)	Argiloso arenoso (19 - 38%, IP: 4 - 15)	Bloco inteiro (300*150*100 mm ³)	8.3-9.7	95% Humidade relativa 28 dias	Bloco inteiro, posição de moldagem, 0.1mm/s	Drop test
(Namango, 2006)	Argiloso (48%)	Bloco inteiro (160*40*40 mm ³)	2-4	14 dias húmido, 14 dias coberto	Bloco inteiro, posição de moldagem, 1,5MPa/s	3% Acima TOA (17%)
(Waziri et al., 2013)	Muito argiloso (75%, IP: 12,6 - 14,4)	Bloco inteiro (210*100*80 mm ³)	2	28 Dias (NR)	1.02mm/min	TOA
(Lourenço, 2002)	NR	NR	4	NR	NR	NR
(Elenga, 2011)	Muito argiloso (64 - 70%, IP: 25.2 - 38.2)	Cilindro Ø 50 L100	6	"Temperatura ambiente à sombra" (NR)	NR	NR
(Bahar et al., 2004)	Muito argiloso (62%, IP: 15)	Cilindro Proctor	NR	Ambiente laboratorial (NR)	CNERIB - (Argélia)	NR

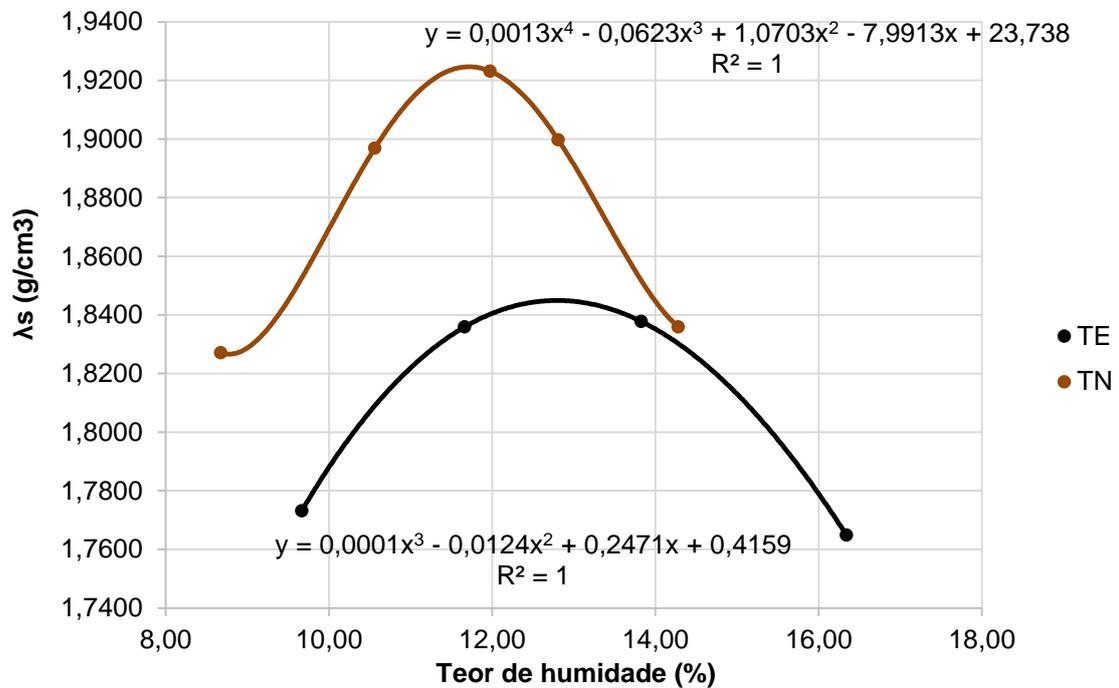
Legenda: NR: Não referido no documento, P.C.: Pressão de compactação, W: Teor de humidade, TOA: Teor Ótimo de Água

ANEXO II

Anexo II.I - Resultado gráfico dos ensaios de limites de consistência das terras



Anexo II.II - Curvas de compactação das terras ensaiadas



ANEXO III

Anexo III.I - Humidades de produção dos BTC – Mistura não estabilizada (drop test)

Mistura:		Não estabilizada (N)		
Amassadura	Peso húmido (g)	Peso seco (g)	Teor de humidade	Teor de humidade média (%)
NI	290	264.6	8.8	9.6
NII	269	240.7	10.5	
NIII	397	361.5	8.9	
NIV	320	285.8	10.7	
NV	453	410.8	9.3	
NVI	311	280.4	9.8	
NVII	347	316.0	8.9	
NVIII	289	264.1	8.6	
NIX	374	340.0	9.1	
NX	455	406.1	10.7	

Anexo III.II - Humidades de produção dos BTC – Mistura estabilizada C (drop test)

Mistura:		Estabilizada com 8% cimento (C)		
Amassadura	Peso húmido (g)	Peso seco (g)	Teor de humidade (%)	Teor de humidade média (%)
CI	506	454.4	10.2	9.5
CII	299	270.4	9.6	
CIII	501	456.1	9.0	
CIV	396	363.8	8.1	
CV	319	293.0	8.2	
CVI	299	268.0	10.4	
CVII	344	308.7	10.3	
CVIII	530	470.1	11.3	
CIX	416	378.2	9.1	
CX	463	423.4	8.6	

Anexo III.III - Humidades de produção dos BTC – Mistura estabilizada M (drop test)

Mistura:		Estabilizada com 4% cimento + 4% cal (M)		
Amassadura	Peso húmido (g)	Peso seco (g)	Teor de humidade	Teor de humidade média (%)
MI	638	571.5	10.4	10.0
MII	480	428.5	10.7	
MIII	487	440.2	9.6	
MIV	447	400.9	10.3	
MV	483	438.8	9.2	
MVI	434	392.4	9.6	
MVII	382	346.4	9.3	
MVIII	472	425.7	9.8	
MIX	464	416.4	10.3	
MX	522	471.5	9.7	

Anexo III.IV - Resultados do ensaio da massa volúmica de produção dos BTC.

Bloco de referência	Massa (Kg)	Espessura (mm)	ρ_{Fresco} (Kg/m ³)	$\rho_{\text{Médio}}$ (Kg/m ³)
Mistura C				
CIR	7.385	90	1986.8	2003.1
CIIR	7.330	90	1972.0	
CIIR	7.750	90	2085.0	
CIVR	7.435	90	2000.3	
CVR	7.165	89	1949.3	
CVIR	7.310	90	1966.6	
CVIIR	7.405	90	1992.2	
CVIIR	7.800	91	2075.4	
CIXR	7.605	90	2046.0	
CXR	7.275	90	1957.2	
Mistura M				
MIR	7.400	90	1990.9	1929.2
MIIR	7.295	90	1962.6	
MIIR	6.980	90	1877.9	
MIVR	7.185	90	1933.0	
MVR	7.215	89	1962.9	
MVIR	7.170	90	1929.0	
MVIIR	7.185	90	1933.0	
MVIIR	7.170	89	1950.6	
MIXR	7.320	90	1969.3	
MXR	6.985	89	1900.3	
MXIR	6.735	90	1811.9	
Mistura N				
NIR	7.210	90	1939.7	1918.9
NIIR	7.240	90	1947.8	
NIIR	6.900	90	1856.3	
NIVR	7.135	90	1919.6	
NVR	7.040	90	1894.0	
NVIR	7.070	90	1902.1	
NVIIR	7.085	90	1906.1	
NVIIR	6.985	89	1900.3	
NIXR	7.155	90	1924.9	
NXR	7.590	91	2019.5	
NXIR	7.055	90	1898.0	

Anexo III.V - Determinação da porosidade dos BTC

Mistura	V _v produção (L)	V _v água (L)		V _v total (L)		Porosidade (η) (%)	
		Fresco	Endurecido	Fresco	Endurecido	Fresco	Endurecido
C	0.528	0.677	0.577	1.205	1.105	32.4	29.7
M	0.637	0.628	0.580	1.265	1.217	34.0	32.7
N	0.656	0.619	0.619	1.274	1.274	34.3	34.3

Anexo III.VI - Resultados do ensaio de massa volúmica dos BTC

Humidade de ensaio	Mistura	Nº Bloco	Peso (g)	Altura (mm)	ρ (kg/m ³)	ρ _m (kg/m ³)
Seco	C	3	6774.3	90	1822.5	1807.4
		24	6579.7	89	1790.1	
		43	6801.4	91	1809.7	
	M	23	6392.2	90	1719.7	1745.2
		33	6495.3	90	1747.5	
		37	6573.6	90	1768.5	
	N	42	6618.8	90	1780.7	1739.4
		44	6418.2	90	1726.7	
		52	6429.7	91	1710.8	
Laboratorial	C	2	7254.1	90	1951.6	1928.2
		19	6998.7	90	1882.9	
		22	7329.3	91	1950.2	
	M	34	6705.1	90	1803.9	1809.1
		39	6554.8	89	1783.3	
		51	6840.0	90	1840.2	
	N	2	6561.8	90	1765.3	1801.8
		8	6539.9	90	1759.5	
		11	7068.0	91	1880.6	
Saturado	C	4	7388.9	90	1987.9	2001.7
		9	7448.5	90	2003.9	
		10	7483.2	90	2013.2	
	M	6	7264.0	89	1976.2	1986.8
		7	7313.5	90	1967.6	
		8	7411.9	89	2016.5	

Anexo III.VII - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura C

Mistura C					
Idade (dias)	Condicionamento	Nº Bloco	f_{cm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	
7	Húmido*	58	2.89	2.70	
		59	2.61		
		62	2.59		
28	Seco	44	5.28	5.37	
		51	5.51		
		54	5.31		
	Saturado	6	2.00	2.24	
		47	2.61		
		53	2.12		
	Laboratorial	2	4.15	4.18	
		40	4.64		
		42	4.45		
	Húmido	65	3.49	3.84	
		13	4.58		
		26	4.75		
		39	2.83		
	90	Laboratorial	52	3.21	5.55
			21	6.59	
56			5.08		
57			4.98		

Anexo III.VIII - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura M

Mistura M					
Idade (dias)	Condicionamento	Nº Bloco	f_{cm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	
7	Húmido*	63	2.03	1.69	
		64	1.87		
		68	1.16		
28	Seco	14	3.13	3.14	
		21	3.10		
		25	3.19		
	Saturado	2	0.71	1.05	
		44	1.04		
		45	1.39		
	Laboratorial	31	2.49	2.34	
		56	2.33		
		61	2.02		
	Húmido	67	2.52	2.01	
		26	1.62		
		50	2.34		
		54	1.98		
	90	Laboratorial	55	2.11	2.91
			35	2.74	
51			3.67		
		52	2.32		

Anexo III.IX - Resultados do ensaio de compressão dos BTC – Mistura N

Mistura N				
Idade (dias)	Condicionamento	Nº Bloco	f_{cm} (MPa)	f_{cm} (MPa)
7	Húmido*	24	0.61	0.84
		26	0.93	
		31	0.97	
28	Seco	7	2.21	2.37
		10	2.64	
		35	2.26	
	Laboratorial	5	1.06	1.34
		12	2.17	
		23	1.07	
		30	1.06	
	Húmido	14	1.20	1.02
		21	1.07	
		25	0.70	
		27	1.11	
	90	Laboratorial	8	1.38
11			2.22	
15			1.70	

Anexo III.X – Resultado do ensaio de compressão diametral

Humidade de ensaio	Mistura	Nº Bloco	f_{t,sp} (MPa)	f_{tm,sp} (MPa)	
Laboratorial	C	33	0.76	0.61	
		46	0.50		
		49	0.58		
	M	13	0.17	0.21	
		62	0.19		
		66	0.26		
	N	19	0.07	0.08	
		29	0.06		
		34	0.11		
Húmido	C	5	0.69	0.67	
		32	0.80		
		63	0.52		
	M	15	0.36	0.38	
		28	0.35		
		48	0.42		
	N	4	0.10	0.12	
		32	0.15		
		NR*	0.09		
		60	1.26		
			64	1.10	

*NR: Valor não registado

Anexo III.XI – Resultado do ensaio de tração por flexão (ambiente laboratorial)

Mistura	Nº Bloco	f_t (MPa)	f_{tm} (MPa)
C	48	1,20	1,19
	60	1,26	
	64	1,10	
M	57	0,71	0,68
	59	0,77	
	60	0,55	
N	6	0,18	0,25
	13	0,25	
	18	0,32	

Anexo III.XII - Resultados do ensaio de medição da velocidade de propagação de ultrassons nos BTC

Humidade de ensaio	Mistura	Nº Bloco	$V_{\mu s}$ (m/s)	$V_{\mu s}$ (m/s)	$V_{\mu s}$ (m/s)	$V_{\mu sm}$ (m/s)
Laboratorial	C	42	1460	1447	1453.5	1581.8
		2	1628	1610	1619.0	
		40	1689	1657	1673.0	
	M	56	1228	1213	1220.5	1196.3
		31	1167	1186	1176.5	
		61	1192	1192	1192.0	
	N	23	1020	1024	1022.0	1009.7
		5	978	975	976.5	
		30	1028	1033	1030.5	
Húmido	C	52	1862	1868	1865.0	1859.7
		39	1839	1839	1839.0	
		26	1866	1884	1875.0	
	M	26	1472	1471	1471.5	1473.0
		50	1496	1483	1489.5	
		55	1463	1453	1458.0	
	N	27	1109	1104	1106.5	1142.7
		21	1154	1151	1152.5	
		14	1172	1166	1169.0	
Saturado	C	7	1940	1936	1938.0	1965.5
		30	1914	1917	1915.5	
		36	2050	2036	2043.0	
	M	7	1806	1810	1808.0	1797.2
		10	1789	1792	1790.5	
		16	1794	1792	1793.0	
N	Desagregaram					

Anexo III.XIII - Resultados do ensaio de condutibilidade térmica dos BTC

Humidade de ensaio	Mistura	Nº Bloco	λ (W/mk)	λ_m (W/mk)
Seco	C	44	0.64	0.65
		51	0.66	
	M	53	0.61	0.61
		60	0.61	
	N	12	0.6	0.58
		45	0.57	
Laboratorial	C	64	0.82	0.82
		48	0.91	
	M	57	0.77	0.77
		59	0.67	
	N	16	0.68	0.68
		18	0.61	
Húmido	C	46	1.04	1.01
		49	0.98	
	M	26	1.37	1.11
		55	0.85	
	N	29	0.76	0.71
		34	0.65	
Saturado	C	6	1.19	1.34
		47	1.48	
	M	2	1.34	1.47
		45	1.59	
	N	-	-	-
		-	-	

Anexo III.XIV - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Mistura	Nº Bloco	C_b (g/cm ² min ^{1/2})							
		10 min	20 min	30 min	60 min	2 h	6 h	24 h	72 h
N	42	-	-	-	-	-	-	-	-
	44	-	-	-	-	-	-	-	-
	52	-	-	-	-	-	-	-	-
M	23	30.94	27.53	26.41	23.56	20.94	15.65	9.65	5.71
	33	29.42	25.05	25.42	22.88	20.76	16.19	9.88	5.79
	37	29.11	25.80	24.45	22.12	19.34	15.12	9.64	5.71
C	3	21.53	18.80	17.42	15.03	12.78	9.70	7.04	4.64
	43	17.15	14.58	14.28	12.45	10.77	7.92	5.48	4.09
	24	23.82	19.44	17.36	14.17	11.57	8.43	6.04	4.47