



Daniel dos Santos Ribeiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Contributo para a caracterização de alvenarias de blocos de terra comprimida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Rocha de Almeida
Arguente: Prof. Doutor José Alexandre Bogas
Vogal: Prof. Doutora M^a. Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2016

‘Copyright’ Daniel dos Santos Ribeiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Concluída a presente dissertação, gostaria de prestar os meus agradecimentos aos intervenientes que tornaram a sua realização possível, graças à sua colaboração, acompanhamento e apoio durante esta etapa.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Professora Doutora Paulina Faria, orientadora desta dissertação de mestrado, pelo excelente acompanhamento, pelos conhecimentos transmitidos, pela exigência e rigor, tornando este período uma experiência bastante enriquecedora.

Ao Engenheiro Vítor Silva pela disponibilidade e acompanhamento durante a realização da campanha experimental, pelos ensinamentos transmitidos e esclarecimento de dúvidas.

Agradeço à minha namorada, Adriana Elias, pela paciência, amizade e amor demonstrado ao longo deste longo percurso académico sendo a minha maior força para a conclusão do curso. O exemplo de perseverança e determinação na forma como encara a vida foi determinante para o meu crescimento enquanto pessoa.

Aos meus colegas de curso, Cláudio Leitão, Tiago Ricardo e Miguel Ornelas pela amizade e companheirismo demonstrado ao longo desta etapa da minha vida e pela ajuda prestada em diversos ensaios realizados.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional ao longo deste percurso. Em especial aos meus pais, João Ribeiro e Olinda Ribeiro, pela educação e valores transmitidos e por serem um exemplo de determinação e força pela forma como lutam diariamente para que possa atingir todos os meus objetivos. Ao meu irmão, André Ribeiro, por me demonstrar, através da sua dedicação ao desporto, que quando queremos muito algo podemos ultrapassar qualquer barreira que surja na vida.

Por fim gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelas condições disponibilizadas a cada aluno, e sobretudo aos professores que através da transmissão de conhecimentos contribuíram para a minha formação.

RESUMO

A terra foi dos primeiros materiais de construção utilizados, uma vez que a construção com este material surgiu com as primeiras sociedades agrícolas. No entanto, o desenvolvimento de novas técnicas construtivas com base em cimento durante o século XX levou a que a construção com terra caísse em desuso.

A utilização de terra como material de construção apresenta vantagens a nível ambiental e a nível económico, uma vez que é possível utilizar terra do próprio local de construção, a sua preparação não implica elevados consumos energéticos e os elementos construtivos com terra apresentam bom comportamento higrotérmico e acústico. No entanto, a diferente composição dos solos, tendo em conta a sua localização geográfica, dificulta a normalização deste tipo de construção, havendo necessidade de uma mais ampla caracterização deste tipo de construção. No caso das alvenarias de blocos de terra intervêm pelo menos dois produtos da construção: os blocos e a argamassa de assentamento.

A presente dissertação tem como objetivo ampliar o conhecimento acerca da caracterização de blocos de terra comprimida estabilizados com baixa percentagem de cimento e respetivas argamassas de assentamento com base em terra. Para tal, após análise de normalização existente, caracteriza-se um tipo de BTC e uma argamassa de assentamento produzidos com terras locais (Caparica) e a alvenaria realizada com base nestes produtos, salientando essencialmente, face a resultados obtidos por outros autores, a influência dos procedimentos de ensaio utilizados e ainda dos blocos e da argamassa ao nível das resistências mecânicas e do comportamento face à água. Para a caracterização dos materiais de terra recorreu-se a procedimentos de ensaio descritos na normalização existente para este tipo de construção e estabeleceram-se outros propositadamente.

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que as características dos blocos, argamassa e alvenarias constituídas pelos dois elementos anteriores podem ser influenciadas pelo teor em humidade ou pela ação da chuva. Esta influência pode ser positiva ou negativa dependendo da característica em análise. Constata-se ainda que os BTC avaliados apresentam propriedades interessantes para serem utilizados como materiais de construção. Além disso, o baixo custo de produção aliado à atual consciencialização face a uma construção mais eco-eficiente, pode suscitar o interesse a nível nacional neste tipo de construção, criando oportunidades de investimento na produção e aplicação de BTC com recurso a solos locais por parte de pequenas e médias empresas em construções onde a inércia seja fundamental. Tendo isso em conta, é importante estabelecerem-se normas nacionais que permitam caracterizar e classificar as argamassas de assentamento de terra e os blocos de terra comprimida produzidos em Portugal.

Palavras-chave: terra, bloco de terra comprimida, argamassa de assentamento, alvenaria, normalização, caracterização

ABSTRACT

Earth was one of the first building materials used, since the construction with this material emerged with the first agricultural societies. However, the development of new construction techniques based on cement during the twentieth century led to the disuse of the earth construction.

The use of earth as a building material presents environmental and economic advantages, since it is possible to use earth from the construction site, the preparation of earth does not involve high energy consumption and earth elements have good hygrothermal and acoustic behavior. Nonetheless, the different composition of the soil, having into account the geographic location, turns difficult the standardization of this type of construction, requiring greater characterization of earth materials. In the case of masonry with earth blocks at least two construction products are involved: the blocks and the masonry mortar.

This dissertation aims to develop the knowledge of the characteristics of compressed earth blocks with a low content of cement and respective masonry mortars based on earth. In order to do so, after analysing the existent standards, a type of CEB and a masonry mortar produced with local earth (Caparica) and a masonry made with these products are characterized, emphasizing the influence of the test procedures and also the blocks and the mortar in terms of mechanical strength and behaviour in the presence of water. For the characterization of earth materials test procedures described in the existing standards for this type of construction and others established purposely were used.

The analysis of the results reveals that the characteristics of the blocks, mortar and masonry constituted by the two previous elements can be influenced by moisture content and by the action of rain. This influence can be positive or negative depending on the analyzed characteristic. It is also noted that the CEB evaluated have interesting properties for use as building material, creating healthier and comfortable spaces for the occupants. Besides that, the low cost of production combined with the current awareness for a more eco-efficient construction can create interest in this type of construction, creating investment opportunities in the production and application of CEB using local soils by small and medium enterprises. Considering this, it is important to establish national standards to characterize and classify the masonry mortars and compressed earth blocks produced in Portugal.

Keywords: earth, compressed earth block, masonry mortar, masonry, standardization, characterization

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivações	1
1.2 Objetivos e metodologia	4
1.3 Estrutura e organização do texto	5
2. Normalização para alvenarias de blocos de terra	7
2.1 Normalização para argamassas de assentamento de terra	7
2.1.1 Considerações gerais	7
2.1.2 Teor em sais	7
2.1.3 Preparação da argamassa, caracterização no estado fresco e provetes	7
2.1.4 Retração linear por secagem	8
2.1.5 Massa volúmica aparente	8
2.1.6 Resistência à compressão e ao corte	9
2.1.7 Resistência à difusão de vapor de água e condutibilidade térmica.....	10
2.1.8 Resistência ao fogo.....	10
2.2 Análise comparativa entre DIN 18946 e NP EN 998-2.....	10
2.2.1 Considerações gerais	10
2.2.2 Teor em sais.....	11
2.2.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido	11
2.2.4 Resistência à compressão e ao corte	11
2.2.5 Resistência à difusão de vapor de água e condutibilidade térmica.....	12
2.2.6 Resistência ao fogo.....	12
2.3 Normalização para blocos de terra comprimida	12
2.3.1 Considerações gerais	12
2.3.2 Propriedades geométricas dos blocos de terra comprimida.....	13
2.3.3 Massa volúmica dos blocos e limite de sais dos constituintes	14
2.3.4 Propriedades mecânicas dos blocos de terra comprimida	15
2.3.5 Comportamento face à água e gelo.....	16
2.3.6 Propriedades térmicas e reação ao fogo dos blocos.....	18
3. Caracterização de alvenarias de blocos de terra	19
3.1 Considerações gerais	19
3.2 Caracterização das argamassas de assentamento	19
3.3 Caracterização dos blocos de terra e das respetivas alvenarias	20
4. Planificação da campanha experimental	27
4.1 Fase prévia	27
4.2 Fase de caracterização experimental.....	28
4.3 Caracterização da argamassa de assentamento	29

4.3.1	Ensaio no estado fresco.....	29
4.3.2	Ensaio no estado endurecido.....	30
4.4	Caracterização de um tipo de bloco de terra comprimida	30
4.5	Caracterização <i>in situ</i> de alvenarias de blocos de terra comprimida	31
5.	Ensaio de caracterização e análise de resultados	33
5.1	Argamassa no estado fresco	33
5.1.1	Consistência por espalhamento.....	33
5.1.2	Consistência por penetrómetro.....	33
5.1.3	Massa volúmica da argamassa fresca.....	34
5.1.4	Teor de ar.....	34
5.2	Argamassa no estado endurecido - provetes prismáticos e circulares	35
5.2.1	Massa volúmica aparente	35
5.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico	36
5.2.3	Resistência à tração por flexão.....	37
5.2.4	Resistência à compressão.....	38
5.2.5	Condutibilidade térmica.....	40
5.3	Ensaio de caracterização dos BTC produzidos	41
5.3.1	Massa volúmica aparente	41
5.3.2	Resistência à compressão - DIN 18945 e UNE 41410.....	41
5.3.3	Resistência à compressão - NTC 5324	42
5.3.4	Resistência à compressão - BTC ensaiado na vertical	44
5.3.5	Resistência à compressão - Meios BTC e argamassa com a mesma composição... ..	45
5.3.6	Resistência à compressão - Provetes de alvenaria.....	46
5.4	Ensaio de caracterização da alvenaria de BTC realizados <i>in situ</i>	48
5.4.1	Condutibilidade térmica.....	48
5.4.2	Ensaio de choque de esfera	50
5.4.3	Resistência superficial por esclerómetro pendular	53
5.4.4	Velocidade de propagação de ultrassons.....	56
5.4.5	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	59
6.	Discussão de resultados	63
6.1	Argamassa de assentamento de terra estabilizada	63
6.2	Blocos de terra comprimida	65
6.3	Alvenarias de blocos de terra comprimida.....	66
6.4	Comparação de resultados com outros autores.....	68
6.4.1	Argamassa de terra estabilizada.....	68
6.4.2	Blocos de terra comprimida	69
6.4.3	Alvenarias de blocos de terra comprimida	72

7. Conclusões	75
7.1 Considerações finais.....	75
7.2 Propostas para trabalhos futuros.....	77
Referências bibliográficas.....	79
Anexos - Resultados individuais obtidos	A.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição geográfica das técnicas construtivas tradicionais de terra em Portugal: taipa (esquerda); adobe (centro); tabique (direita). (Jorge et al. (2005), citado por Gomes (2015)).....	2
Figura 1.2 - Construções em taipa na região do Alentejo para turismo rural (www.casasbrancas.pt)	3
Figura 1.3 - Blocos de terra comprimida (à esq.); exemplo de uma prensa manual - modelo Press 3000 Multi-Mould Manual Press (www.earth-auroville.com) (à dir.)	4
Figura 4.1 - Murete 1 (topo não protegido) e murete 2 (topo protegido por telhas cerâmicas)	28
Figura 4.2 - Mistura da argamassa de assentamento (à esq.); Provetes prismáticos de argamassa (ao cent.); Provete para avaliar resistência à compressão (à dir.).....	29
Figura 5.1 - Procedimento de realização do ensaio de consistência por espalhamento	33
Figura 5.2 - Penetrómetro com haste vertical e êmbolo na extremidade (à esq.); recipiente normalizado (à dir.).....	34
Figura 5.3 - Recipiente com argamassa após compactação da primeira camada (à esq.); Equipamento para determinação do teor de ar (à dir.)	35
Figura 5.4 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aparente	36
Figura 5.5 - Equipamento “ZEUS Resonance Meter” e aspeto do software de cálculo.....	37
Figura 5.6 - Ensaio de resistência à tração por flexão (à esq.); Provete apoiado em dois pontos distanciados por 100 mm (à dir.)	38
Figura 5.7 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão	38
Figura 5.8 - Ensaio de resistência à compressão (à esq.); Rotura do meio provete (à dir.)	39
Figura 5.9 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão	39
Figura 5.10 - Equipamento ISOMET 2104 (à esq.); Ensaio de condutibilidade térmica, com sonda API 210412, sobre provete circular de argamassa (à dir.)	40
Figura 5.11 - Ensaio de resistência à compressão (à esq.); Rotura do bloco com formação de cone de compressão (à dir.).....	42
Figura 5.12 - Colocação entre duas chapas metálicas para garantir contacto eficaz.....	43
Figura 5.13 - Ensaio de compressão axial do bloco na vertical (à esq.); Rotura do bloco com formação de fissura vertical (à dir.)	44
Figura 5.14 - Rotura do provete com argamassa com a mesma composição durante ensaio de resistência à compressão	45
Figura 5.15 - Imersão do bloco em água (à esq.): Preenchimento da junta entre os dois meios blocos com argamassa (ao cent.); aplicação de uma camada de argamassa sobre os meios blocos (à dir.) ...	47
Figura 5.16 - Ensaio de resistência à compressão do provete (à esq.); Rotura do provete com formação de fissuras verticais (à dir.)	47
Figura 5.17 - Ensaio de condutibilidade térmica (à esq.); Sonda API 210412 colocada no topo do murete 2 (à dir.)	48
Figura 5.18 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde o ensaio foi realizado no topo dos muretes	49
Figura 5.19 - Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica	49

Figura 5.20 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde foi realizado o ensaio na face Norte (à esq.) e face Sul (à dir.) - alçados	50
Figura 5.21 - Aparelho de Martinet-Baronnie (à esq.); Impacto da esfera no murete (ao cent.); Mossa provocada pela esfera na superfície do bloco (à dir.)	50
Figura 5.22 - Resultados obtidos no ensaio de choque de esfera na face Norte de cada murete	51
Figura 5.23 - Resultados obtidos no ensaio de choque de esfera na face Sul de cada murete.....	51
Figura 5.24 - Valores médios de cada cota obtidos através do ensaio de choque de esfera em ambas as faces dos muretes	52
Figura 5.25 - Representação esquemática dos pontos (a azul) onde foi realizado o ensaio na face Norte (à esq.) e face Sul (à dir.) - alçados	53
Figura 5.26 - Esclerómetro pendular - modelo Schmidt PM (à esq.); Pêndulo libertado através do botão de disparo (à dir.)	53
Figura 5.27 - Resultados obtidos para a resistência superficial por esclerómetro pendular na face Norte	54
Figura 5.28 - Resultados obtidos para a resistência superficial por esclerómetro pendular na face Sul	54
Figura 5.29 - Valores médios de resistência superficial para cada cota em ambas as faces dos muretes.....	55
Figura 5.30 - Aparelho Pundit Lab da marca Proceq (à esq.); Posicionamento dos transdutores eletroacústicos (à dir.)	56
Figura 5.31 - Representação esquemática dos pontos (a azul) onde foi realizado o ensaio através do método indireto no murete 1 (à esq.) e murete 2 (à dir.) com distâncias pré-definidas (1 - 15cm; 2 - 30cm) - alçados	57
Figura 5.32 - Representação esquemática de um ponto onde foi realizado o ensaio através do método direto no murete 1 (a vermelho) e murete 2 (a azul) - corte horizontal.....	57
Figura 5.33 - Resultados obtidos para a velocidade de propagação de ultrassons através do método indireto em ambos os muretes	57
Figura 5.34 - Resultados obtidos para a velocidade de propagação de ultrassons através do método direto em ambos os muretes	58
Figura 5.35 - Valores médios de velocidade de propagação de ultrassons para cada cota dos muretes...	58
Figura 5.36 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde foi realizado o ensaio de absorção de água sob baixa pressão no murete 1 (à esq.) e murete 2 (à dir.) - alçados	59
Figura 5.37 - Fixação de tubo de Karsten ao murete com anel de plasticina de modo a garantir estanquidade do sistema	60
Figura 5.38 - Quantidade de água absorvida sob baixa pressão por tubos de Karsten ao fim de 4 minutos nos blocos dos muretes (face Sul)	61
Figura 6.1 - Relação entre massa volúmica e resistência à compressão da argamassa de assentamento	64
Figura 6.2 - Comparação da massa volúmica do BTC analisado com as referidas por outros autores	69
Figura 6.3 - Comparação da resistência à compressão obtida através do ensaio de blocos inteiros - horizontal (à esq.) e meios BTC sobrepostos (à dir.) com as referidas por outros autores	70

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classes de massa volúmica de argamassas de assentamento de terra (com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))	9
Quadro 2.2 - Classes de resistência de argamassas de assentamento de terra (com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))	9
Quadro 2.3 - Ensaio de resistência ao fogo de argamassas de assentamento de terra (com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))	10
Quadro 2.4 - Propriedades geométricas dos blocos de terra comprimida	14
Quadro 2.5 - Massa volúmica dos blocos de terra comprimida e teor de sais da terra	15
Quadro 2.6 - Resistência à compressão de acordo com as normas em análise	15
Quadro 2.7 - Comportamento face à água e gelo dos blocos de terra comprimida - requisitos e procedimentos de ensaio	17
Quadro 2.8 - Comportamento face à água e gelo dos blocos de terra comprimida - requisitos e procedimentos de ensaio (cont.)	18
Quadro 2.9 - Propriedades térmicas e reação ao fogo dos blocos de terra comprimida	18
Quadro 3.1 - Estudos de caracterização de argamassas de assentamento com base em terra desenvolvidos nos últimos anos	19
Quadro 3.2 - Estudos de caracterização de blocos de terra e de alvenarias com eles realizadas desenvolvidos nos últimos anos	20
Quadro 3.3 - Síntese dos ensaios realizados por vários autores para determinar a resistência à compressão dos BTC - vantagens e desvantagens	24
Quadro 4.1 - Constituintes e composição volumétrica dos BTC e da argamassa de assentamento	27
Quadro 4.2 - Ensaio realizado à argamassa de assentamento no estado fresco e normas de ensaio ...	29
Quadro 4.3 - Ensaio realizado no estado endurecido e normas de ensaio	30
Quadro 4.4 - Ensaio realizado aos blocos e normas de ensaio	31
Quadro 4.5 - Ensaio realizado in situ e normas de ensaio	31
Quadro 4.6 - Condições de HR e temperatura durante realização de ensaios in situ	32
Quadro 5.1 - Valores médios de ambas as faces e valores globais obtidos através do ensaio de choque de esfera	52
Quadro 5.2 - Valores médios de resistência superficial de ambas as faces e valores médios globais	55
Quadro 5.3 - Valor médio do coeficiente de absorção e da quantidade de água absorvida sob baixa pressão por tubos de Karsten ao fim de 4 minutos nos blocos dos muretes (face Sul)	61
Quadro 6.1 - Resultados obtidos na caracterização da argamassa de assentamento no estado fresco	63
Quadro 6.2 - Resultados obtidos na caracterização da argamassa de assentamento no estado endurecido	64
Quadro 6.3 - Resultados dos ensaios de massa volúmica e resistência à compressão dos BTC	65
Quadro 6.4 - Resultados obtidos na caracterização in situ dos dois muretes	66

SIMBOLOGIA

SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación
AFNOR - Association Française de Normalisation
ASTM - American Society for Testing and Materials
BS - British Standard
BSI - British Standards Institution
CEN - Comité Européen de Normalisation
DIN - Deutsches Institut für Normung
EN - European Norm
FCT NOVA - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
IPQ - Instituto Português da Qualidade
ISO - International Organization for Standardization
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NABau - Normenausschuss Bauwesen
NBR - Norma Brasileira
NF XP - Norme Française Expérimentale
NP - Norma Portuguesa
NTC - Norma Técnica Colombiana
UNE - Una Norma Española

MATERIAIS

BTC - Bloco de Terra Comprimida
CEB - Compressed Earth Block
CL90 - Cal aérea com 90% de óxido de cálcio
HL5 - Cal hidráulica HL5 produzida pela Secil
NHL3,5 - Cal hidráulica natural NHL3,5 produzida pela Secil
RCD - Resíduos de Construção e Demolição

ENSAIOS E PARÂMETROS

C_{ab} - Coeficiente de absorção
 E_{din} - Módulo de elasticidade dinâmico
HR – Humidade relativa
 R_c - Resistência à compressão
 R_t - Resistência à tração por flexão
 V_{us} – Velocidade de propagação de ultrassons
 λ - Condutibilidade térmica

DISSEMINAÇÃO DE RESULTADOS

No âmbito da pesquisa inicial e campanha experimental desenvolvida na presente dissertação já foram realizadas algumas publicações preliminares:

- RIBEIRO D., FARIA P., SILVA V. (2016), Alvenarias de blocos de terra - influência das argamassas de assentamento. ARGAMASSAS 2016 – II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 16-17 Junho 2016, ITeCons, Coimbra, ID 03, 96-107.
- RIBEIRO D., SILVA V., FARIA P. (2016), Caracterização de blocos de terra comprimida. TEST&E 2016 – 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil, 4-6 Julho 2016, RELACRE, Lisboa, ID 01014.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivações

A terra é um recurso disponível em todo o mundo e a sua utilização como material de construção surgiu há milhares de anos com o aparecimento das primeiras sociedades agrícolas, que datam de 12.000 a 7.000 a.C. (Bruno et al., 2010). Este tipo de construção sofreu várias adaptações ao longo dos anos devido a fatores como a localização geográfica, a composição do solo, o clima, a mão-de-obra e o equipamento utilizado. De facto, estima-se que atualmente cerca de 30% da população mundial habite edifícios construídos com base em terra (Mansour et al., 2016).

O pouco conhecimento relativamente às propriedades mecânicas e processos construtivos apropriados, bem como o aparecimento de novas técnicas construtivas com base em cimento durante o século XX, levaram a que a utilização de terra caísse em desuso. No entanto, o constante aumento do custo energético de materiais de construção mais tradicionais, como o tijolo cerâmico e o cimento, e a consciencialização face à importância de uma construção mais eco-eficiente, levou a uma renovação do interesse na construção em terra, já que a utilização deste recurso permite reduzir os consumos energéticos relativos ao transporte, por ser possível utilizar terra do próprio local de construção, e relativos à produção, já que envolve um simples processo de escavação, destorroamento e homogeneização (Ribeiro et al., 2016a). Além disso, a utilização e aplicação da terra não gera resíduos e é reciclável desde que não seja estabilizada quimicamente (Cagnon et al., 2014).

As alvenarias com blocos de terra comprimida, estabilizados através da adição de uma baixa percentagem de ligante ou não estabilizados, pelas características da sua matéria-prima de base (a argila da terra) e pela massa apresentada, apresentam um elevado potencial higrotérmico e acústico para melhorar as condições de conforto dos edifícios (Ribeiro et al., 2016b). As propriedades higrotérmicas deste material permitem assim a regulação da humidade relativa interior, amortecendo a variação deste parâmetro, e a evaporação da água contida nas paredes proporciona um efeito refrescante em climas quentes, funcionando como um ar condicionado natural (Cagnon et al., 2014).

A estabilização pode reduzir a permeabilidade ao vapor de água do material. No caso da estabilização da terra com adição de cimento ou cal, esta redução pode ser provocada pelo desenvolvimento de cristais durante os processos de hidratação e carbonatação, dificultando assim a acessibilidade aos poros (McGregor et al., 2014).

A atual consciencialização ambiental com vista a uma maior ecoeficiência da construção levou a uma renovação do interesse na construção em terra. No entanto, a variedade existente na composição dos solos dificulta a normalização da construção com terra, havendo necessidade de um maior conhecimento das características deste tipo de construção e dos materiais de terra utilizados (Ribeiro et al., 2016b).

Uma das propriedades fundamentais na caracterização de BTC é a resistência à compressão, uma vez que permite aferir a qualidade do bloco. De facto, este parâmetro é muitas vezes considerado como a característica mecânica mais importante dos materiais de construção (Aubert et al., 2015).

Os blocos de terra comprimida podem ser utilizados em alvenarias resistentes desde que apresentem resistências superiores aos requisitos estabelecidos nas normas de aplicação existentes (Gomes et al., 2014). De outro modo, devem ser aplicados em alvenarias apenas de preenchimento.

Em Portugal a construção com terra encontra-se presente em todo o país ainda que, com maior expressão em determinadas zonas. Na Figura 1.1 é possível observar a distribuição geográfica das várias técnicas construtivas de terra em Portugal.

Verifica-se que, em Portugal, a construção com terra localiza-se principalmente no sul do país. As características do solo, a herança cultural dos povos que habitaram a Península Ibérica como é o caso dos muçulmanos, o clima mais seco e o ambiente rural são fatores determinantes para a maior expressão deste tipo de construção nesta região. No entanto, no centro e norte litoral surge também forte incidência de alvenarias de adobe o no norte interior prolifera o tabique com argamassas de terra. Portugal apresenta assim um dos mais ricos patrimónios da Europa no que diz respeito à construção com terra, recorrendo a diversas técnicas construtivas, como o adobe e a taipa, adaptando-se as mesmas em função de diversos fatores como a composição do solo, a localização e o clima. Além destas técnicas construtivas, também as argamassas de terra foram muito utilizadas no passado em Portugal para rebocos interiores e para o assentamento de algumas alvenarias revestidas (Santos & Faria, 2015).

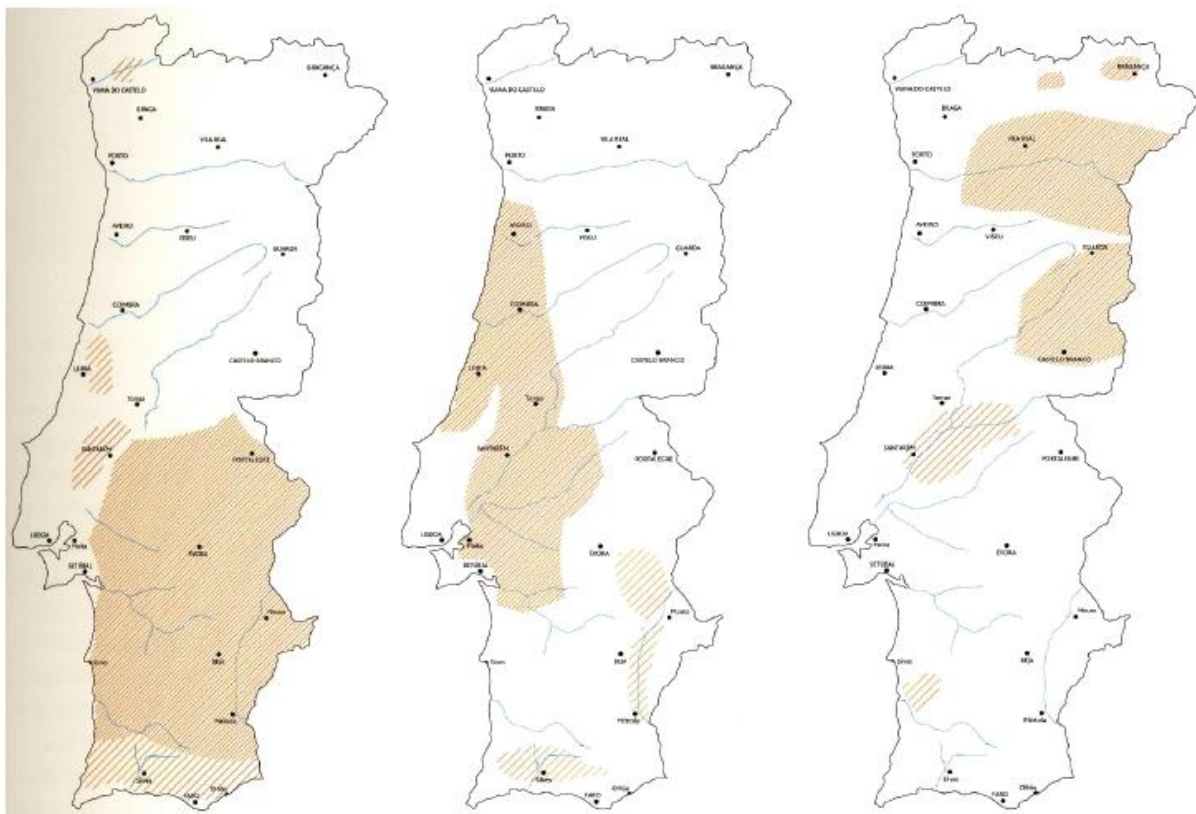


Figura 1.1 - Distribuição geográfica das técnicas construtivas tradicionais de terra em Portugal: taipa (esquerda); adobe (centro); tabique (direita). (Jorge et al. (2005), citado por Gomes (2015))

Tal como no resto do mundo, também em Portugal a construção com terra foi caindo em desuso com o surgimento de novas técnicas construtivas como a alvenaria de tijolo cozido e o betão. A falta de

conhecimento relativamente a aspetos de resistência estrutural e técnicas construtivas foi mais um motivo para que a construção em terra fosse considerada pobre, fraca e ineficaz.

Com a crescente necessidade a nível mundial de uma construção mais eco-eficiente, provocada pelo aumento do custo energético dos materiais utilizados atualmente, tem-se investigado e caracterizado as técnicas construtivas e os materiais de terra utilizados como é o caso dos blocos de terra comprimida (BTC). No entanto, a investigação desenvolvida tem progredido lentamente, não existindo normalização portuguesa ou europeia que facilite construir com terra. Tem-se apostado assim principalmente na reabilitação dos edifícios em terra existentes com vista a uma valorização deste tipo de construção através do turismo rural (Figura 1.2).



Figura 1.2 - Construções em taipa na região do Alentejo para turismo rural (www.casasbrancas.pt)

A necessidade de um maior conhecimento da construção em terra levou a que vários países desenvolvidos em todo o mundo, como é o caso da Alemanha, Espanha, Brasil e Colômbia, desenvolvessem estudos de caracterização deste tipo de construção e dos materiais utilizados, nomeadamente de BTC, culminando na publicação de normas de requisitos e procedimentos de ensaio, com base nas quais se realizou a presente dissertação.

Tendo em conta a investigação desenvolvida em Portugal destaca-se a importância de, à semelhança dos países mencionados, ser estabelecida uma norma portuguesa que permita caracterizar e classificar os BTC produzidos e aplicados em Portugal, bem como as argamassas de assentamento utilizadas.

As primeiras utilizações dos BTC como material de construção ocorreram na Europa no início do século XIX pelo arquiteto François Cointeraux (Gomes, 2015). Para o fabrico dos primeiros blocos recorreu-se a um sistema com moldes em madeira onde o solo húmido foi colocado e compactado com os pés.

Os BTC atuais (Figura 1.3 - à esquerda) são constituídos por solo, estabilizado ou não estabilizado, que após ser humedecido e colocado num molde é compactado por prensa manual (Figura 1.3 - à direita) ou mecânica. Atualmente, os equipamentos existentes no mercado permitem fabricar BTC com diferentes formas e dimensões.



Figura 1.3 - Blocos de terra comprimida (à esq.); exemplo de uma prensa manual - modelo Press 3000 Multi-Mould Manual Press (www.earth-auroville.com) (à dir.)

A estabilização química (através da adição de cimentos, cal ou outros agentes estabilizadores) ou física (através da inserção de fibras ou agregados, nomeadamente para correção da composição granulométrica) permite viabilizar a utilização de praticamente todos os tipos de solo para o fabrico de BTC. O processo de estabilização permite construções com alturas superiores, paredes mais finas e uma maior resistência à ação da água.

A elevada capacidade higroscópica, o baixo custo de produção, aliado à possibilidade de utilizar solo do próprio local de construção, e o facto de não serem necessárias elevadas competências técnicas para o fabrico e aplicação são algumas das vantagens dos BTC. No entanto, a utilização deste tipo de material apresenta também desvantagens, como a sua elevada massa que inviabiliza a utilização dos BTC para construção de edifícios de grande porte e a sua eventual suscetibilidade à ação da água.

Pela relação das alvenarias de BTC com técnicas ancestrais de construção com terra, a dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial.

1.2 Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo alargar o conhecimento das características de blocos de terra comprimida e respetivas argamassas de assentamento. Os objetivos mais específicos são avaliar os ensaios que podem ser representativos das características dos BTC e das alvenarias com eles construídas e a influência que os procedimentos de ensaio podem ter nos resultados obtidos. Para tal,

avaliam-se as características de um tipo de BTC, estabilizado através da adição de baixa percentagem de cimento, produzido com terras locais no âmbito do *Workshop* de Blocos de Terra Comprimida realizado em outubro de 2015 na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, em colaboração com a Associação Centro da Terra, e caracteriza-se uma argamassa de assentamento de terra também estabilizada, produzida em condições de laboratório. Os resultados obtidos são comparados com resultados de outros autores.

A caracterização dos blocos de terra comprimida e da argamassa de assentamento será obtida através de ensaios em condições laboratoriais e *in situ*. Os ensaios *in situ* serão realizados em dois muretes de alvenaria dos mesmos BTC assentes com argamassa de assentamento com a mesma composição dos blocos, construídos no âmbito do *Workshop* de Blocos de Terra Comprimida, procurando assim obter uma caracterização mais próxima da realidade.

Com vista a atingir os objetivos e embora a argamassa de assentamento seja estabilizada, esta será caracterizada de acordo com a norma alemã DIN 18946 (NABau, 2013a), que define os requisitos e métodos de ensaio para argamassas de assentamento de terra não estabilizadas, e os BTC serão caracterizados segundo as normas DIN 18945 (NABau, 2013b), UNE 41410 (AENOR, 2008) e NTC 5324 (ICONTEC, 2004), que definem os requisitos e métodos de ensaio para BTC não estabilizados, estabilizados quimicamente ou não estabilizados e estabilizados por adição de cimento, respetivamente. Recorre-se ainda a outros documentos normativos e procedimentos de ensaio estabelecidos propositadamente.

1.3 Estrutura e organização do texto

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se o enquadramento do tema, onde são expostas as problemáticas e motivações que levaram à realização desta investigação, os objetivos definidos, a metodologia seguida.

No segundo capítulo apresentam-se os requisitos e procedimentos de ensaio definidos na norma alemã para argamassas de assentamento de terra (NABau, 2013a) e uma análise comparativa com a norma europeia e portuguesa NP EN 998-2 (IPQ, 2010). Este capítulo inclui ainda, uma comparação entre os requisitos e métodos de ensaio estabelecidos nas normas NTC 5324 (ICONTEC, 2004), NBR 8491 (ABNT, 2012a), UNE 41410 (AENOR, 2008) e DIN 18945 (NABau, 2013b), para blocos de terra comprimida estabilizados e não estabilizados, procurando salientar os aspetos em comum.

No terceiro capítulo apresentam-se os estudos que têm vindo ao longo dos anos a ser desenvolvidos de modo a caracterizar BTC estabilizados e não estabilizados, avaliando ainda a influência da argamassa de assentamento neste tipo de alvenaria.

A planificação da campanha experimental constitui o quarto capítulo, onde se apresenta a estrutura e sequência dos ensaios realizados com o objetivo de caracterizar a argamassa de assentamento, os BTC e os dois muretes construídos na Estação Experimental de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos.

No quinto capítulo apresentam-se os procedimentos de ensaio e resultados da caracterização da argamassa de assentamento de terra estabilizada, dos BTC e dos dois muretes de alvenaria de BTC.

A discussão de resultados constitui o sexto capítulo, onde se apresentam quadros resumo com os resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental e realiza-se uma discussão dos resultados através da comparação com resultados de outros autores.

No sétimo capítulo apresentam-se as conclusões do estudo desenvolvido e sugerem-se algumas propostas para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas mencionadas ao longo da dissertação e em anexo as tabelas de resultados individuais obtidos em cada ensaio de caracterização.

2. NORMALIZAÇÃO PARA ALVENARIAS DE BLOCOS DE TERRA

2.1 Normalização para argamassas de assentamento de terra

2.1.1 Considerações gerais

A construção com terra assenta num conhecimento empírico transmitido de geração em geração até aos nossos dias, não existindo em Portugal qualquer regulamentação para este tipo de construção. No entanto, o renovado interesse na construção em terra, por parte de determinados países em todo o mundo, levou à publicação de normas de requisitos que permitem a caracterização e classificação de BTC e argamassas de assentamento de terra.

Em 2013, a Alemanha publicou a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) que refere os termos, definições, requisitos e métodos de ensaio para argamassas de assentamento de alvenarias, constituídas por terra sem qualquer estabilização química e sem qualquer outro ligante para além da terra (Ribeiro et al., 2016a).

De acordo com essa norma alemã (NABau, 2013a) as argamassas de assentamento de terra devem ser analisadas quanto à retração linear, massa volúmica aparente, resistência à compressão e ao corte, resistência à difusão de vapor de água, condutibilidade térmica, comportamento ao fogo.

No caso de se suspeitar da existência de sais prejudiciais em quantidades que possam provocar deterioração da argamassa, a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) indica que deve ser realizado um ensaio para determinação do teor de sais do produto pré-doseado das argamassas de assentamento de terra. Para a realização de grande parte dos ensaios a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) remete para normas já existentes de caracterização de argamassas, nomeadamente diversas partes da EN 1015.

2.1.2 Teor em sais

A DIN 18946 (NABau, 2013a) define valores limite para as quantidades de sais que a argamassa deve respeitar, tendo em conta os possíveis efeitos prejudiciais de quantidade excessivas. Desta forma a argamassa não deve apresentar valores superiores a 0,02 M.-% de nitratos, 0,10 M.-% de sulfatos e 0,08 M.-% de cloretos. A norma (NABau, 2013a) impõe ainda que o conteúdo total de qualquer sal não pode exceder 0,12 M.-%.

2.1.3 Preparação da argamassa, caracterização no estado fresco e provetes

A DIN 18946 (NABau, 2013a) define que as argamassas de terra a caracterizar devem ser preparadas com base no indicado na norma europeia EN 1015-2 (CEN, 1998a) mas com algumas adaptações. A amassadura deve ser feita com recurso a um equipamento de amassadura mecânico de acordo com o seguinte procedimento:

- Colocação de água no recipiente de amassadura;
- Introdução de sólidos durante 30 segundos sob amassadura constante por parte do equipamento;
- 30 segundos adicionais de amassadura a que se segue um período de repouso de 5 minutos e por fim amassadura durante mais 30 segundos.

A quantidade de água deve ser ajustada pelo produtor de modo a cumprir o espalhamento definido na norma.

A DIN 18946 (NABau, 2013a) define que a argamassa de assentamento não estabilizada no estado fresco deve possuir uma massa volúmica superior a $1,2 \text{ kg/dm}^3$ e consistência por espalhamento, determinada segundo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999a), de $175 \pm 5 \text{ mm}$.

Segundo a norma alemã (NABau, 2013a) devem ser produzidos provetes prismáticos de dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ [mm]}$, realizados de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (CEN, 1999b). Em ensaios específicos são indicados outros tipos de provetes. As propriedades da argamassa resultam da média de todos os provetes ensaiados.

2.1.4 Retração linear por secagem

A retração linear por secagem deve ser determinada em três provetes prismáticos colocados em câmara condicionada a $23 \pm 5^\circ\text{C}$ e $50 \pm 15\%$ de humidade relativa (HR) até atingirem massa constante (variação de massa em 24h inferior a $0,1\%$). A medição é feita com recurso a uma craveira no comprimento do prisma, a meia-altura. Os resultados de retração resultam da redução de comprimento, em percentagem, em relação ao comprimento inicial do prisma. A DIN 18946 (NABau, 2013a) define que a retração linear por secagem deve ser apresentada com uma casa decimal e resulta da média dos três provetes.

A norma alemã (NABau, 2013a) define que a retração linear para argamassas de terra não deve ser superior a $2,5\%$ embora considere que para argamassas de terra com fibras a retração possa assumir valores até 4% .

2.1.5 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente deve ser determinada em três provetes prismáticos colocados em câmara condicionada a $23 \pm 5^\circ\text{C}$ e $50 \pm 15\%$ de HR até atingirem massa constante. Com recurso a uma craveira, são medidas as dimensões dos provetes ao centro de cada face e determinada a massa com a utilização de uma balança com um erro não superior $0,1 \text{ g}$. A massa volúmica no estado endurecido resulta da relação entre a massa e o volume exterior dos provetes.

A DIN 18946 (NABau, 2013a) define que os valores individuais de massa volúmica devem ser arredondados a duas casas decimais e expressos em kg/dm^3 . A massa volúmica da argamassa deve ser arredondada a duas casas decimais e resulta da média dos valores individuais, podendo ser classificada, segundo a norma (NABau, 2013a), de acordo com o Quadro 2.1 em classes de massa volúmica.

De acordo com a norma alemã (NABau, 2013a), as argamassas de assentamento de terra não estabilizadas para alvenarias estruturais devem pertencer no mínimo à classe 1,6. As argamassas de assentamento que pertençam às classes compreendidas entre $0,9$ e $1,2$ podem ser designadas pelo fabricante como argamassas leves.

Quadro 2.1 - Classes de massa volúmica de argamassas de assentamento de terra
(com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))

Classes de Massa Volúmica	Massa Volúmica média [kg/dm ³]
0,9	0,80 a 0,90 ^a
1,0	0,91 a 1,00 ^a
1,2	1,01 a 1,20 ^b
1,4	1,21 a 1,40 ^b
1,6	1,41 a 1,60 ^b
1,8	1,61 a 1,80 ^b
2,0	1,81 a 2,00 ^b
2,2	2,01 a 2,20 ^b
^a Desvio padrão de $\pm 0,05$ kg/dm ³	
^b Desvio padrão de $\pm 0,10$ kg/dm ³	

2.1.6 Resistência à compressão e ao corte

A DIN 18946 (NABau, 2013a) estabelece que o ensaio de resistência à compressão deve ser realizado de acordo com a EN 1015-11 (CEN, 1999b) a um mínimo de três provetes que, através da quebra central ou corte, resultam em seis provetes (meios prismas) de ensaio. Os resultados devem ser expressos em N/mm², arredondados a uma casa decimal. As argamassas de assentamento para paredes resistentes devem ter uma resistência à compressão mínima de 2 N/mm², sendo aceitáveis valores inferiores noutros tipos de aplicação.

A norma alemã (NABau, 2013a) define que o ensaio de resistência ao corte deve ser realizado segundo a EN 1052-3 (CEN, 2002a). Os provetes de ensaio são constituídos por três fiadas de blocos de silicato de cálcio para alvenaria, interligados com a argamassa a ensaiar. São aplicadas, nos provetes de ensaio, pré-cargas verticais de 0,05 N/mm², 0,10 N/mm² e 0,20 N/mm² e de seguida é aplicada uma carga horizontal. As argamassas de assentamento para paredes resistentes devem ter uma resistência ao corte mínima de 0,02 N/mm², sendo aceitáveis valores inferiores noutros tipos de aplicação. Os resultados devem ser expressos em N/mm², arredondados a duas casas decimais.

Os provetes para o ensaio de resistência à compressão e resistência ao corte devem ser colocados em câmara condicionada a 23 \pm 2°C e 50 \pm 15% de HR durante pelo menos 7 dias antes dos ensaios. A DIN (NABau, 2013a) permite a classificação das argamassas em classes de acordo com o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Classes de resistência de argamassas de assentamento de terra
(com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))

Classes de resistência	Resistência à compressão [N/mm ²]	Resistência ao corte [N/mm ²]
M0	-	-
M2	$\geq 2,0$	$\geq 0,02$
M3	$\geq 3,0$	$\geq 0,03$
M4	$\geq 4,0$	$\geq 0,04$

2.1.7 Resistência à difusão de vapor de água e condutibilidade térmica

Segundo a norma DIN 18946 (NABau, 2013a), para a resistência à difusão de vapor de água (μ) pode ser assumido o valor $\mu=5/10$ sem realização de nenhum ensaio. No entanto, a mesma norma refere que a resistência à difusão de vapor de água da argamassa de assentamento de terra pode ser determinada de acordo com a norma EN ISO 12572 (CEN, 2001a) ou a NP EN 1015-19 (IPQ, 2008).

No que diz respeito à condutibilidade térmica de argamassas de assentamento de terra, a norma DIN (NABau, 2013a) refere que deve ser determinada segundo a norma DIN V 4108-4 (DIN, 2013), não consultada.

2.1.8 Resistência ao fogo

De acordo com a DIN 18946 (NABau, 2013a), o comportamento ao fogo das argamassas de assentamento de terra deve ser avaliado e classificado de acordo com as normas alemãs DIN 4102-1 (DIN, 1998, não consultada) e DIN 4102-4 (DIN, 1994, não consultada). O ensaio de resistência ao fogo é definido consoante a classe de cada material (A1, A2 ou B1). No Quadro 2.3 é possível conferir qual o ensaio a realizar e a sua periodicidade, tendo em conta a classe da argamassa.

As argamassas de assentamento sem agregados orgânicos ou fibras, ou com um conteúdo desses materiais inferior a 1% em massa ou volume (adota-se o valor maior), de acordo com a norma DIN 4102-4 (DIN, 1994), podem ser automaticamente classificadas como sendo de classe A1 sem realização de ensaio.

Quadro 2.3 - Ensaio de resistência ao fogo de argamassas de assentamento de terra
(com base na norma DIN 18946 (NABau, 2013a))

Classe do material	Ensaio	Frequência
A1, A2	DIN 4102-1:1998-05, 5.1.3	1 x por ano
B1	DIN 4102-1:1998-05, 6.2	1 x por ano

2.2 Análise comparativa entre DIN 18946 e NP EN 998-2

2.2.1 Considerações gerais

A norma NP EN 998-2 (IPQ, 2010) indica os requisitos aplicáveis às argamassas industriais para assentamento de alvenarias, com constituições e ligantes variados, definindo propriedades para argamassas no estado fresco e endurecido.

Através da análise das normas DIN 18946 (NABau, 2013a) e NP EN 998-2 (IPQ, 2010) é possível verificar que existem requisitos comuns às duas normas. As normas DIN 18946 (NABau, 2013a) e a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) avaliam o teor em sais, a massa volúmica, a resistência à compressão, a resistência inicial ao corte, a resistência à difusão de vapor de água, a condutibilidade térmica e a resistência ao fogo.

2.2.2 Teor em sais

A DIN 18946 (NABau, 2013a) estabelece limites quanto ao teor em sulfatos, nitratos e cloretos. A NP EN 998-2 (IPQ, 2010) apenas estabelece o limite de teor em cloretos da argamassa de assentamento, sendo esse limite de 0,1% em massa da argamassa seca. Comparando os dois limites verifica-se que a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) permite uma maior quantidade de cloretos ainda que a diferença seja pouco significativa.

2.2.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido

As normas DIN 18946 (NABau, 2013a) e NP EN 998-2 (IPQ, 2010) especificam o mesmo procedimento de ensaio para determinar a massa volúmica de uma argamassa de assentamento, sendo esse procedimento também referido na EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a). A norma DIN (NABau, 2013a) permite a classificação de acordo com classes de massa volúmica, considerando que argamassas com massa volúmica entre 0,9 kg/dm³ e 1,2 kg/dm³ são designadas como argamassas leves. A NP EN 998-2 (IPQ, 2010) não faz referência a classes de massa volúmica mas, no entanto, refere que argamassas com massa volúmica inferior a 1,3 kg/dm³ podem ser designadas como argamassas leves.

2.2.4 Resistência à compressão e ao corte

Tal como estabelecido pela DIN 18946 (NABau, 2013a), também a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) indica que o ensaio de resistência à compressão de uma argamassa de assentamento deve ser realizado de acordo com a norma EN 1015-11 (CEN, 1999b) e permite a sua classificação segundo classes de resistência.

A norma alemã (NABau, 2013a) apresenta classes para valores de resistências à compressão superiores ou iguais a 2 N/mm²; já a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) permite classificar a argamassa a partir de resistências de 1 N/mm². A norma portuguesa (IPQ, 2010) apresenta um maior número de classes e com valores superiores aos da DIN (NABau, 2013a), permitindo assim classificar uma maior gama de resistências.

Tal como referido pela norma alemã (NABau, 2013a), também a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) define que o ensaio de resistência inicial ao corte deve ser realizado de acordo com a norma EN 1052-3 (CEN, 2002a).

A NP EN 998-2 (IPQ, 2010) não permite a classificação das argamassas de assentamento segundo classes de resistência inicial ao corte, apresentando apenas dois requisitos tendo em conta o tipo de utilização da argamassa: 0,15 N/mm² para argamassas de uso geral e 0,30 N/mm² para argamassas em camada fina.

Os requisitos indicados na NP EN 998-2 (IPQ, 2010) quanto à resistência inicial ao corte são superiores aos da norma alemã (NABau, 2013a), demonstrando assim que as argamassas industriais de ligantes distintos têm de apresentar maiores resistências mínimas.

2.2.5 Resistência à difusão de vapor de água e condutibilidade térmica

De acordo com a NP EN 998-2 (IPQ, 2010), para a permeabilidade ao vapor de água de argamassas de assentamento, podem ser adotados os valores tabelados que constam do Quadro A12 da norma EN 1745 (CEN, 2002b). A resistência à difusão de vapor resulta do quociente entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água da argamassa de assentamento.

Constata-se, assim, que de acordo com a norma alemã (NABau, 2013a) e a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) é possível obter o fator de resistência à difusão de vapor sem necessidade de ensaio. A norma DIN (NABau, 2013a) refere ainda a possibilidade de ensaiar a argamassa de modo a avaliar a resistência à difusão de vapor de água de acordo com a EN ISO 12572 (CEN, 2001a). No entanto, a norma portuguesa (IPQ, 2010) não faz referência a essa possibilidade.

Quanto à condutibilidade térmica de argamassas de assentamento, a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) refere a possibilidade de se adotar um valor tabelado de acordo com o Quadro A12 da EN 1745 (CEN, 2002b) ou através de um ensaio realizado com base na mesma norma. A norma DIN (NABau, 2013a) define que a condutibilidade apenas deve ser obtida através de um ensaio realizado de acordo com a norma DIN V 4108-4 (DIN, 2013, não consultada).

2.2.6 Resistência ao fogo

Tal como a norma alemã (NABau, 2013a), também a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) estabelece que argamassas de assentamento contendo no máximo 1% em massa ou volume (adota-se o valor maior) de materiais orgânicos homogeneamente distribuídos podem ser automaticamente classificadas como sendo da classe A1 sem realização de ensaio.

Se o teor de matéria orgânica for superior a 1%, a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) define que a argamassa deve ser ensaiada e classificada de acordo com a norma EN 13501-1 (CEN, 2007), enquanto a norma DIN (NABau, 2013a) refere que o ensaio e classificação devem ser realizados de acordo com as normas alemãs DIN 4102-1 (DIN, 1998) e DIN 4102-4 (DIN, 1994). Tal como referido anteriormente, estas normas não foram consultadas.

As normas NP EN 998-2 (IPQ, 2010) e DIN 18946 (NABau, 2013a) definem, assim, o ensaio e classificação da resistência ao fogo de argamassas de assentamento através de normas diferentes. No entanto, o fator que determina a necessidade de realização de ensaio e classificação é de 1% para ambas as normas, sendo este valor não ultrapassado pela maioria das argamassas de terra ou de ligantes minerais correntes.

2.3 Normalização para blocos de terra comprimida

2.3.1 Considerações gerais

A norma colombiana NTC 5324 (ICONTEC, 2004) tem por base a norma francesa NF XP P13-901 (AFNOR, 2001) que define requisitos, especificações e procedimentos de ensaio para blocos de terra comprimida. A NTC 5324 (ICONTEC, 2004) aplica-se a BTC estabilizados por adição de cimento, obtidos através de compressão estática ou dinâmica, e define os requisitos quanto às dimensões, aspeto e

defeitos, absorção de água por capilaridade, variações dimensionais em condições extremas, resistência à compressão seca e húmida e resistência à abrasão.

A norma brasileira NBR 8491 (ABNT, 2012a) permite caracterizar e classificar os BTC sem função estrutural, estabilizados por adição de cimento e produzidos de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012b), com recurso a prensa manual ou hidráulica. De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012a), os BTC devem ser analisados quanto às dimensões, resistência à compressão e absorção de água.

A norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008) estabelece os requisitos e procedimentos de ensaio para BTC obtidos por compressão estática ou dinâmica de terra húmida, seguida de desmoldagem imediata. A UNE (AENOR, 2008) permite a caracterização e classificação de BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; no caso de estabilização com cimento, cal ou gesso o teor deve ser inferior ou igual a 15% da massa seca do bloco. De acordo com a norma espanhola (AENOR, 2008) os BTC devem ser analisados quanto às dimensões, aspeto e defeitos, massa volúmica aparente e absoluta, teor de matéria orgânica e sais da terra, resistência à compressão, resistência a ciclos de humedecimento/secagem, resistência à erosão acelerada, absorção de água por capilaridade, resistência a ciclos de gelo/degelo, propriedades térmicas, permeabilidade ao vapor de água, reação ao fogo e aderência.

A DIN 18945 (NABau, 2013b) estabelece que os BTC não estabilizados devem ser classificados segundo classes de aplicação, variando alguns requisitos de acordo com a classe a que pertencem. A norma alemã (NABau, 2013b) define assim quatro classes de aplicação:

- Ia – estrutura de madeira, preenchida por alvenaria de blocos de terra rebocados, exposta à intempérie;
- Ib – alvenaria de blocos de terra rebocada, exposta à intempérie;
- II – alvenaria de blocos de terra exterior protegida da intempérie ou alvenaria interior;
- III – alvenaria seca (com blocos de terra apenas empilhados).

Segundo a DIN (NABau, 2013b), os BTC devem ser analisados quanto às dimensões, teor de sais, massa volúmica aparente, resistência à compressão, deformação sob carregamento, ensaio de imersão, absorção de água por capilaridade, resistência a ciclos de gelo/degelo, resistência à difusão de vapor, condutibilidade térmica e resistência ao fogo.

2.3.2 Propriedades geométricas dos blocos de terra comprimida

A NTC 5324 (ICONTEC, 2004) refere que os BTC devem ser avaliados quanto às variações dimensionais em condições extremas. De acordo com a norma (ICONTEC, 2004), a colocação dos BTC num ambiente com temperaturas entre 33 e 45°C deve resultar numa retração inferior a 0,45 mm/m, enquanto a expansão por imersão dos BTC em água deve ser no máximo 0,30 mm/m.

No Quadro 2.4 apresentam-se as propriedades geométricas e ensaios comuns às normas NTC 5324 (ICONTEC, 2004), NBR 8491 (ABNT, 2012a), UNE 41410 (AENOR, 2008) e DIN 18945 (NABau, 2013b).

Quadro 2.4 - Propriedades geométricas dos blocos de terra comprimida

	NTC 5324	NBR 8491	UNE 41410	DIN 18945
Dimensões	Duas dimensões correntes de fabrico, admitindo pequenos desvios: 140x95x295 mm 220x95x220 mm	Análise dimensional realizada de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012c). Duas dimensões correntes admitindo outras dimensões desde que comprimento>largura: 100x50x200 mm 120x70x240 mm	Análise dimensional realizada de acordo com a EN 772-16 (CEN, 2011a), não indicando dimensões correntes.	Abrange uma vasta gama de dimensões, apresentando dimensões mínimas, máximas e nominais. Refere também os desvios dimensionais possíveis.
Aspetos e defeitos	BTC devem ter faces planas e arestas retilíneas. Destacamentos nos vértices e arestas e microfissuras são aceitáveis caso cumpram os limites referidos.	-	BTC devem ter faces planas e arestas retilíneas. Destacamentos nos vértices e arestas e microfissuras são aceitáveis caso cumpram os limites referidos.	-
Nota: NTC 5324 - BTC estabilizados por adição de cimento; NBR 8491 - BTC estabilizados por adição de cimento; UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados				

Ao analisar as propriedades dimensionais constata-se que a DIN 18945 (NABau, 2013b) abrange uma maior gama de dimensões, sendo admitidos desvios em todas as normas analisadas. De acordo com as normas (ICONTEC, 2004; ABNT, 2012a; AENOR, 2008; NABau, 2013b), todos os BTC devem ter a forma de um paralelepípedo.

A norma colombiana (ICONTEC, 2004) e a norma espanhola (AENOR, 2008) estabelecem requisitos quanto ao aspeto e defeitos que os BTC devem cumprir. Os limites para o cumprimento dos requisitos quanto aos destacamentos e microfissuras por parte dos BTC são iguais em ambas as normas (ICONTEC, 2004; AENOR, 2008).

2.3.3 Massa volúmica dos blocos e limite de sais dos constituintes

Da análise das quatro normas, NTC 5324 (ICONTEC, 2004), NBR 8491 (ABNT, 2012a), UNE 41410 (AENOR, 2008) e DIN 18945 (NABau, 2013b), verifica-se que apenas as normas espanhola (AENOR, 2008) e alemã (NABau, 2013b) têm em conta a massa volúmica e o teor de sais, como se apresenta no Quadro 2.5. A UNE (AENOR, 2008) faz ainda referência ao teor de matéria orgânica admitido e massa volúmica absoluta no caso de existirem exigências acústicas.

Através da análise comparativa entre a UNE (AENOR, 2008) e a DIN (NABau, 2013b), constata-se que a norma alemã (NABau, 2013b) permite a classificação segundo classes de massa volúmica e apresenta limites mais baixos no que diz respeito ao teor de sais. A UNE 41410 (AENOR, 2008) estabelece ainda

que o teor de matéria orgânica da terra que constitui os BTC não pode ser $\geq 2\%$ e deve ser determinado de acordo com a UNE 103204 (AENOR, 1993).

Quadro 2.5 - Massa volúmica dos blocos de terra comprimida e teor de sais da terra

	UNE 41410	DIN 18945
Massa volúmica	Determinada de acordo com a EN 772-13 (CEN, 2001b). No caso de existirem exigências acústicas deve ainda ser determinada a massa volúmica absoluta de acordo com a mesma norma (CEN, 2001b).	Determinada de acordo com o referido na DIN (NABau, 2013b), com classificação em classes com um mínimo de $0,4 \text{ kg/dm}^3$ e um máximo de $2,2 \text{ kg/dm}^3$.
Teor de sais	O teor de sais solúveis da terra que constitui os BTC não pode ser $\geq 2\%$ e deve ser determinado de acordo com a UNE 103205 (AENOR, 2006).	Limites para o teor de nitratos ($\leq 0,02 \text{ M.-%}$), sulfatos ($\leq 0,10 \text{ M.-%}$) e cloretos ($\leq 0,08 \text{ M.-%}$). Nenhum sal pode exceder $0,12 \text{ M.-%}$.
Nota: UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados		

2.3.4 Propriedades mecânicas dos blocos de terra comprimida

A resistência à compressão é muitas vezes considerada a característica mecânica mais importante dos materiais de construção (Aubert et al., 2015), funcionando como um medidor da qualidade dos blocos de terra (Morel et al., 2007). Tendo isto em conta, todas as normas estudadas (ICONTEC, 2004; ABNT, 2012a; AENOR, 2008; NABau, 2013b) têm esta propriedade em comum. No Quadro 2.6 apresentam-se os requisitos relativos à resistência à compressão e os procedimentos de ensaio indicados por cada norma.

Quadro 2.6 - Resistência à compressão de acordo com as normas em análise

	NTC 5324	NBR 8491	UNE 41410	DIN 18945
Resistência à compressão	Ensaio realizado sobre dois meios blocos sobrepostos, interligados por argamassa de cimento e areia ao traço 1:5 em volume. Meios blocos secos até massa constante e submersos em água durante 2 horas. Classes de resistência à compressão seca de 2-6 N/mm^2 e classes de resistência à compressão húmida de 1-3 N/mm^2 .	Ensaio realizado de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012c) em dois meios blocos sobrepostos, interligados com uma camada fina de pasta de cimento. A resistência à compressão média dos blocos deve ser $\geq 2 \text{ N/mm}^2$ sem nenhum valor individual $\leq 1,7 \text{ N/mm}^2$.	Ensaio realizado de acordo com a UNE EN 772-1 (CEN, 2011b) num bloco inteiro. Classificação segundo classes de resistência com um mínimo de $1,3 \text{ N/mm}^2$ e máximo de 5 N/mm^2 .	Ensaio realizado diretamente sobre o bloco para alturas nominais $> 71 \text{ mm}$; para altura $\leq 71 \text{ mm}$ é realizado em dois meios blocos sobrepostos, interligados por argamassa de cimento. Classificação segundo classes de resistência com um mínimo de $2,5 \text{ N/mm}^2$ e máximo de $7,5 \text{ N/mm}^2$. Nenhum valor individual $\leq 2,0 \text{ N/mm}^2$.
Nota: NTC 5324 - BTC estabilizados por adição de cimento; NBR 8491 - BTC estabilizados por adição de cimento; UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados				

Ao analisar o Quadro 2.6, verifica-se que apenas a NBR 8491 (ABNT, 2012a) não permite a classificação dos BTC segundo classes de resistência, sendo apenas mencionados na norma (ABNT, 2012a) um valor médio mínimo e um valor individual mínimo. Constata-se também que a NTC 5324 (ICONTEC, 2004) e a NBR 8491 (ABNT, 2012a) indicam um procedimento de ensaio semelhante, diferindo apenas na composição da junta de assentamento que interliga os dois meios blocos. As normas espanhola (AENOR, 2008) e alemã (NABau, 2013b) permitem ensaiar o bloco inteiro diretamente entre os pratos da prensa sendo que, no caso da DIN (NABau, 2013b), o ensaio direto só é indicado para alturas nominais superiores a 71 mm. A DIN 18945 (NABau, 2013b) permite a classificação de uma maior gama de resistências à compressão.

Além dos requisitos comuns às quatro normas estudadas (ICONTEC, 2004; ABNT, 2012a; AENOR, 2008; NABau, 2013b), as diferentes localizações geográficas, o clima, a composição do solo, o tipo de aplicação e utilização, entre outros fatores, levam a que existam requisitos próprios de cada país. A NTC 5324 (ICONTEC, 2004) refere que os BTC sujeitos a abrasão resultante da atividade humana devem ser analisados quanto a essa ação. O ensaio deve ser realizado com recurso a uma escova metálica sobre a qual se coloca um peso e se efetuam escovagens sucessivas durante um minuto. Determina-se o coeficiente de abrasão através do quociente entre a área de abrasão e a variação de massa. A norma colombiana (ICONTEC, 2004) permite a classificação do BTC segundo classes, tendo em conta o coeficiente de abrasão.

Segundo a norma alemã (NABau, 2013b), os blocos devem ser analisados quanto ao módulo de elasticidade estático. É utilizado um ensaio cíclico com amplitude máxima de 1/3 da carga de rotura sendo o módulo de elasticidade determinado ao terceiro ciclo. Segundo a DIN 18945 (NABau, 2013b), os BTC utilizados em paredes resistentes devem ter um módulo de elasticidade estático $\geq 750 \text{ N/mm}^2$.

De acordo com a UNE 41410 (AENOR, 2008), caso os BTC sejam utilizados em paredes resistentes devem ser avaliados quanto à resistência inicial ao corte de acordo com a EN 1052-3 (CEN, 2002a).

2.3.5 Comportamento face à água e gelo

Segundo a norma UNE 41410 (AENOR, 2008), os BTC submetidos a exposição severa devem ser analisados quanto à resistência à erosão acelerada, através da queda de uma corrente contínua de água de uma altura de 1 m sobre um BTC inclinado, formando um ângulo de 27° com a horizontal, durante 10 minutos. Se a profundidade da cavidade provocada pela queda da água estiver entre 0 e 10mm, o bloco é considerado apto. A norma espanhola (AENOR, 2008) estabelece também que os BTC submetidos a esse tipo de exposição devem ser avaliados quanto à resistência a ciclos de humedecimento e secagem. A avaliação desta propriedade consiste na imersão do BTC em água durante 30 segundos, seguido de secagem ao ar até atingir a cor do BTC de referência. Após 6 ciclos o bloco deve ser analisado visualmente, não se devendo observar as anomalias mencionadas na UNE 41410 (AENOR, 2008) como por exemplo eflorescências na superfície, modelo de fissuras aleatório, destacamento geral ou localizado de camadas de solo, deformações.

No Quadro 2.7 apresentam-se os requisitos e procedimentos de ensaio que permitem avaliar o comportamento dos BTC face à água e gelo. No que diz respeito à absorção de água por capilaridade, a NTC 5324 (ICONTEC, 2004) e a UNE 41410 (AENOR, 2008) definem o mesmo procedimento de ensaio; já a DIN 18945 (NABau, 2013b) procura avaliar as anomalias no BTC provocada pela absorção de água. Quanto ao ensaio de imersão em água do BTC, a norma brasileira (ABNT, 2012a) procura avaliar o ganho de massa enquanto a norma alemã (NABau, 2013b) avalia a perda de massa.

Quadro 2.7 - Comportamento face à água e gelo dos blocos de terra comprimida - requisitos e procedimentos de ensaio

	NTC 5324	NBR 8491	UNE 41410	DIN 18945
Absorção de água por capilaridade	Determinação do coeficiente de absorção: BTC fracamente capilares – $C_b \leq 20 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ BTC pouco capilares – $C_b \leq 40 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$	-	Determinação do coeficiente de absorção de acordo com a EN 772-11 (CEN, 2011c). Mesmo procedimento de ensaio que NTC (ICONTEC, 2004). Não são definidos requisitos.	Colocação do BTC num recipiente com uma lâmina de água. Após 30 minutos (BTC tipo II), 3 horas (BTC tipo Ib) e 24 horas (BTC tipo Ia) não se devem observar fissuras e deformações nas faces laterais e superior.
Ensaio de imersão	-	De acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012c), o BTC deve ser imerso em água durante 24 horas. A massa de água absorvida resulta do quociente entre a variação de massa e a massa inicial. A absorção média deve ser $\leq 20\%$ sem nenhum valor individual $> 22\%$.	-	Após imersão do BTC em água durante 10 minutos, a perda de massa para os BTC do tipo Ia e Ib deve ser $\leq 5\%$ e para os BTC do tipo II $\leq 15\%$.
Permeabilidade ao vapor de água	-	-	Determinada de acordo com a EN ISO 12572 (CEN, 2001a).	Pode ser admitido o fator de resistência à difusão de vapor $\mu=5/10$ ou determinada a permeabilidade ao vapor de água de acordo com a EN ISO 12572 (CEN, 2001a).
Nota: NTC 5324 - BTC estabilizados por adição de cimento; NBR 8491 - BTC estabilizados por adição de cimento; UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados				

Quadro 2.8 - Comportamento face à água e gelo dos blocos de terra comprimida - requisitos e procedimentos de ensaio (cont.)

	NTC 5324	NBR 8491	UNE 41410	DIN 18945
Resistência ciclos de gelo/degelo	-	-	O fabricante deve declarar a resistência aos ciclos de gelo/degelo, tendo em conta a experiência conhecida da zona em que os BTC serão aplicados.	O BTC é colocado numa câmara de congelação até atingir - 15°C e mantido durante 34 horas, seguido de ambiente a 23°C durante 24 horas (1 ciclo). Após 5 ciclos (BTC do tipo Ib) e 15 ciclos (BTC do tipo Ia) não se devem observar fissuras e deformações.
Nota: NTC 5324 - BTC estabilizados por adição de cimento; NBR 8491 - BTC estabilizados por adição de cimento; UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados				

As normas UNE (AENOR, 2008) e DIN (NABau, 2013b) indicam que a determinação da permeabilidade ao vapor de água deve ser realizada de acordo com a EN ISO 12572 (CEN, 2001a). Das quatro normas estudadas (ICONTEC, 2004; ABNT, 2012a; AENOR, 2008; NABau, 2013b) apenas a DIN 18945 (NABau, 2013b) apresenta efetivamente requisitos quanto à resistência a ciclos de gelo/degelo.

2.3.6 Propriedades térmicas e reação ao fogo dos blocos

No Quadro 2.9 apresentam-se os procedimentos de ensaio que dizem respeito às propriedades térmicas e reação ao fogo. No que diz respeito à reação ao fogo apenas a norma DIN (NABau, 2013b) refere que a classe dos BTC deve ser determinada de acordo com as normas DIN 4102-1 (DIN, 1998) e DIN 4102-4 (DIN, 1994).

Quadro 2.9 - Propriedades térmicas e reação ao fogo dos blocos de terra comprimida

	UNE 41410	DIN 18945
Propriedades térmicas	Propriedades térmicas determinadas de acordo com a EN 1745 (CEN, 2002b).	Condutibilidade térmica determinada de acordo com a norma DIN V 4108-4 (DIN, 2013).
Reação ao fogo	O fabricante deve declarar a classe de reação ao fogo dos BTC utilizados em elementos com exigências de resistência ao fogo.	Classe dos BTC determinada de acordo com a DIN 4102-1 (DIN, 1998) e a DIN 4102-4 (DIN, 1994). Os BTC sem constituintes orgânicos ou fibras podem ser classificados como sendo da classe A1 sem realização de ensaio.
Nota: UNE 41410 - BTC não estabilizados e estabilizados quimicamente; DIN 18945 - BTC não estabilizados		

3. CARACTERIZAÇÃO DE ALVENARIAS DE BLOCOS DE TERRA

3.1 Considerações gerais

O aumento do custo energético dos materiais utilizados tradicionalmente na construção e a crescente consciencialização para uma construção mais eco-eficiente levou à renovação do interesse na construção com terra. Conhecido o elevado potencial higrotérmico e acústico e o baixo custo de produção das alvenarias de blocos de terra, têm vindo ao longo dos anos a ser realizados inúmeros estudos de caracterização de BTC estabilizados e não estabilizados avaliando ainda a influência da argamassa de assentamento neste tipo de alvenaria.

Grande parte dos estudos caracteriza os blocos de terra individualmente ou em pequenos provetes de alvenaria, existindo ainda poucos estudos que avaliem as características das alvenarias de BTC em muretes com dimensões significativas. Existem também poucos estudos de caracterização das argamassas de assentamento de blocos de terra, incidindo sobretudo na avaliação da resistência à compressão.

3.2 Caracterização das argamassas de assentamento

No Quadro 3.1 apresentam-se dois estudos de caracterização de argamassas de assentamento de blocos de terra, especificando a composição e características das argamassas, os parâmetros avaliados e as normas e procedimentos de ensaio adotados.

Quadro 3.1 - Estudos de caracterização de argamassas de assentamento com base em terra desenvolvidos nos últimos anos

Ref. Bibliogr.	Matérias primas	Características	Ensaio	Norma ou procedimento de ensaio
Gomes et al. (2014)	Solo de Montemor-o-Novo + NHL3,5 (traço vol. 1:4) Solo de Badajoz + NHL3,5 (traço vol. 1:4)	Provetes prismáticos de argamassa 40x40x160 [mm]	Resistência à compressão	EN 1015-11 (CEN, 1999b)
Oliveira et al. (2007)	Cal hidratada + solo de Aveiro + areia (traço vol. 1:1:2)	Provetes cúbicos de argamassa 50x50x50 [mm]	Resistência à compressão	Procedimento de ensaio com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999b)

Gomes et al. (2014) avaliou a resistência à compressão de BTC através do ensaio de dois meios blocos sobrepostos interligados por uma junta de argamassa. De modo a avaliar a influência da argamassa de assentamento na resistência dos BTC (uma vez que a argamassa deve ser compatível física e mecanicamente com os blocos), o autor determinou a resistência à compressão de argamassas com uma composição semelhante à dos BTC, já que normalmente a argamassa mais compatível apresenta uma composição idêntica à do próprio bloco.

O traço volumétrico adotado por Oliveira et al. (2007) para a argamassa de assentamento teve em consideração as composições das argamassas encontradas na zona onde se recolheram os blocos de adobe avaliados no estudo.

As argamassas com base em terra, além da aplicação para assentamento de alvenarias, podem ainda por exemplo, ser aplicadas como revestimentos exteriores e interiores. Tendo isto em conta, Faria et al. (2014) e Santos & Faria (2015) realizaram estudos de caracterização de uma argamassa de terra não estabilizada pré-doseada para reboco interior.

3.3 Caracterização dos blocos de terra e das respetivas alvenarias

No Quadro 3.2 apresentam-se alguns dos estudos de caracterização de blocos de terra e alvenarias com eles realizadas, especificando a composição e características dos blocos e argamassas, os parâmetros avaliados e as normas ou procedimentos de ensaio adotados.

Quadro 3.2- Estudos de caracterização de blocos de terra e de alvenarias com eles realizadas desenvolvidos nos últimos anos

Ref. Bibliogr.	Matérias-primas	Características	Ensaio	Norma ou procedimento de ensaio
Mansour et al. (2016)	Solo não estabilizado	BTC obtidos por compactação mecânica 70x70x70 [mm]	Massa volúmica aparente	NF P18-559 (AFNOR, 1992)
			Resistência à compressão	Procedimento de ensaio com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999b)
		BTC obtidos por compactação mecânica 70x70x20 [mm]	Condutibilidade térmica	Método do fio quente com base em Vozár (1996)
Aubert et al. (2015)	Solo não estabilizado	BTC obtidos por extrusão 105x62x222 [mm]	Resistência à compressão (bloco na horizontal)	DIN 18945 (NABau, 2013b) UNE 41410 (AENOR, 2008)
			Resistência à compressão (meios blocos interligados por argamassa de cimento e areia ao traço 1:5)	NF XP P13-901 (AFNOR, 2001)

Quadro 3.2 - Estudos de caracterização de blocos de terra e de alvenarias com eles realizadas desenvolvidos nos últimos anos (cont.)

Ref. Bibliogr.	Matérias-primas	Características	Ensaio	Norma ou procedimento de ensaio
Aubert et al. (2015)	Solo não estabilizado	BTC obtidos por extrusão 105x62x222 [mm]	Resistência à compressão (bloco na vertical)	Ensaio de compressão axial do BTC na vertical, estabelecido propositadamente
Silva (2015)	Solo não estabilizado Solo + 8% de cimento	BTC obtidos por compactação manual 295x140x90 [mm]	Massa volúmica aparente	DIN 18945 (NABau, 2013b) EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a)
			Resistência à compressão (meios BTC sobrepostos com junta seca)	Procedimento de ensaio com base na norma NBR 8492 (ABNT, 2012c)
			Condutibilidade térmica	Procedimento de ensaio com base no manual do equipamento ISOMET 2114
			Velocidade de propagação de ultrassons	NP EN 12504-4 (IPQ, 2007)
Gomes (2015)	<u>BTC de Montemor-o-Novo (E)</u> Solo Montemor-o-Novo + 25% RCD + 6,25% de HL5 <u>BTC de Badajoz (B)</u> Solo Badajoz + 5% de cal aérea +1,7% de cimento	BTC obtidos por compactação mecânica 295x140x90 [mm]	Velocidade de propagação de ultrassons	NP EN 12504-4 (IPQ, 2007)
			Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	FE Pa 39 (LNEC, 2002)
Gomes et al. (2014)	<u>BTC de Montemor-o-Novo (E)</u> Solo Montemor-o-Novo + 25% RCD + 6,25% de HL5 <u>BTC de Badajoz (B)</u> Solo Badajoz + 5% de cal aérea +1,7% de cimento	BTC obtidos por compactação mecânica 295x140x90 [mm]	Resistência à compressão (meios BTC interligados por argamassa de NHL3,5 e solo de Montemor-o-Novo (E) e de Badajoz (B) - ao traço vol. 1:4	Procedimento de ensaio com base na norma NBR 8492 (ABNT, 2012c)

Quadro 3.2 - Estudos de caracterização de blocos de terra e de alvenarias com eles realizadas desenvolvidos nos últimos anos (cont.)

Ref. Bibliogr.	Matérias primas	Características	Ensaio	Norma ou procedimento de ensaio
Cagnon et al. (2014)	Solo não estabilizado	BTC obtidos por compactação mecânica 60x40x20 [mm]	Massa volúmica aparente	DIN 18945 (NABau, 2013b) e EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a) em blocos após secagem em estufa a 50°C
McGregor et al. (2014)	50% de solo + 50% de areia + 4% de cimento 50% de solo + 50% de areia + 4% de cal aérea CL90	BTC obtidos por compactação mecânica	Massa volúmica aparente	DIN 18945 (NABau, 2013b) e EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a) em blocos após secagem em estufa a 50°C
Lima et al. (2012)	Solo de Aveiro + 6 ou 12% de cimento	BTC obtidos por compactação manual	Resistência à compressão (meios BTC interligados por pasta de cimento)	NBR 8492 (ABNT, 2012c)
Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009)	Solo + 5% de cimento	BTC obtidos por compactação mecânica	Resistência à compressão (provetes de alvenaria de BTC assentes por argamassa de cimento e areia ao traço vol. 1:5)	BS 5628-1 (BSI, 2005)
Oliveira et al. (2007)	-	Provetes cilíndricos obtidos de uma construção em adobe parcialmente demolida em Aveiro	Resistência à compressão	Ensaio de compressão uniaxial dos provetes cilíndricos, estabelecido propositadamente
		Adobes obtidos de uma construção parcialmente demolida em Aveiro	Resistência à compressão (provetes de alvenaria de adobes assentes por argamassa de cal aérea hidratada, solo de Aveiro e areia ao traço vol. 1:1:2)	Ensaio de compressão uniaxial dos provetes com dimensões de 200x200x400 mm, estabelecido propositadamente

Quadro 3.2 - Estudos de caracterização de blocos de terra e de alvenarias com eles realizadas desenvolvidos nos últimos anos (cont.)

Ref. Bibliogr.	Matérias primas	Características	Ensaio	Norma ou procedimento de ensaio
Morel et al. (2007)	Solo + 4-10% de cimento	BTC obtidos por compactação manual 295x140x90 [mm]	Resistência à compressão (meios blocos interligados por uma argamassa com a mesma composição)	Olivier et al. (1997)
Ngowi (1997)	Solo + 5% de cimento	BTC obtidos por compactação manual 260x120x90 [mm]	Massa volúmica aparente	DIN 18945 (NABau, 2013b) EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a)
	Solo não estabilizado Solo + 5% de cimento		Resistência à compressão	DIN 18945 (NABau, 2013b) UNE 41410 (AENOR, 2008)
Walker (1995)	Solo + 5% de cimento	BTC obtidos por compactação manual 295x140x90 [mm]	Massa volúmica aparente	DIN 18945 (NABau, 2013b) EN 1015-10/A1 (CEN, 2006a)
			Resistência à compressão	DIN 18945 (NABau, 2013b) UNE 41410 (AENOR, 2008)

No que diz respeito à composição dos BTC, os estudos apresentados no Quadro 3.2 caracterizam blocos constituídos por solo não estabilizado e estabilizado quimicamente. A estabilização química, através da adição de cimentos, cais com propriedades hidráulicas ou cais aéreas, influencia as características dos blocos permitindo obter um melhor comportamento mecânico, redução da porosidade, aumento da resistência à fendilhação e redução da permeabilidade à água líquida. De acordo com Walker (1995), a percentagem de cimento adicionada para estabilização do solo deve estar compreendida entre 5 e 10% (em volume), uma vez que abaixo de 5% as arestas dos blocos tornam-se friáveis e acima de 10% a utilização deste tipo de materiais para a construção torna-se economicamente inviável. Além disso, segundo Ngowi (1997) a adição de 3 a 6% de cimento apenas diminui a absorção de água, sendo necessário adicionar quantidades superiores a 6% para que as resistências mecânicas dos blocos aumentem.

Tendo em conta o crescente interesse na construção com terra, os equipamentos para produção de BTC têm sido melhorados, através da implementação de atuadores hidráulicos mecanizados, que possibilitam o fabrico de grandes quantidades de blocos sem necessidade de intervenção humana no processo de

compactação, eliminando assim o erro associado à aplicação de diferentes forças de compactação. Este facto pode explicar a maior caracterização de BTC obtidos por compactação mecânica como observado no Quadro 3.2.

Sendo a resistência à compressão uma das propriedades fundamentais na caracterização de BTC verifica-se que a maioria dos estudos apresentados no Quadro 3.2 avalia este parâmetro. No entanto, tal como mencionado por Aubert et al. (2015), não existe atualmente consenso quanto ao melhor método de ensaio para a determinação da resistência à compressão, sendo mesmo estabelecidos alguns procedimentos propositadamente. Este facto pode explicar os diferentes procedimentos de ensaio adotados pelos autores para avaliar a resistência dos blocos de terra (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Síntese dos ensaios realizados por vários autores para determinar a resistência à compressão dos BTC - vantagens e desvantagens

Procedimento de ensaio	Vantagens	Desvantagens
Ensaio de compressão uniaxial de blocos inteiros na horizontal Mansour et al. (2016); Aubert et al. (2015); Ngowi (1997); Walker (1995)	Procedimento de simples aplicação Aplicável a BTC obtidos por extrusão e por compactação mecânica ou manual	A baixa proporção altura/largura quando o BTC é ensaiado na horizontal pode introduzir forças de confinamento, que se traduzem numa resistência superior à real Indicado apenas para BTC com altura nominal superior a 71 mm de acordo com a norma DIN 18945 (NABau, 2013b)
Ensaio de compressão uniaxial de blocos inteiros na vertical Aubert et al. (2015)	Procedimento de simples aplicação Ensaio do bloco na vertical aumenta a proporção altura/largura, reduzindo a influência de forças de confinamento	Indicado para blocos obtidos por extrusão
Ensaio de compressão uniaxial de dois meios BTC sobrepostos interligados por uma argamassa de cimento e areia Aubert et al. (2015)	Duplica a proporção altura/largura reduzindo a influência de forças de confinamento Junta de argamassa permite transferência de esforços	Corte dos BTC provoca vibrações, pondo em causa a sua integridade Junta de argamassa menos rígida que BTC devido ao elevado teor de água inicial e falta de compactação Argamassa pouco compatível com BTC Qualidade do provete de ensaio depende de quem o produz

Quadro 3.3 - Síntese dos ensaios realizados por vários autores para determinar a resistência à compressão dos BTC - vantagens e desvantagens (cont.)

Procedimento de ensaio	Vantagens	Desvantagens
Ensaio de compressão uniaxial de dois meios BTC sobrepostos interligados por pasta de cimento Lima et al. (2012)	Duplica a proporção altura/largura, reduzindo a influência de forças de confinamento Junta com pasta de cimento permite transferência de esforços	Corte dos BTC provoca vibrações, pondo em causa a sua integridade Junta de argamassa menos rígida que BTC devido ao elevado teor de água inicial e falta de compactação Pasta de cimento pouco compatível com BTC Qualidade do provete de ensaio depende de quem o produz
Ensaio de compressão uniaxial de dois meios BTC sobrepostos interligados por uma argamassa com a mesma composição dos blocos Morel et al. (2007)	Duplica a proporção altura/largura, reduzindo a influência de forças de confinamento Junta de argamassa permite transferência de esforços Argamassa compatível com os BTC	Corte dos BTC provoca vibrações, pondo em causa a sua integridade Junta de argamassa menos rígida que BTC devido ao elevado teor de água inicial e falta de compactação Qualidade do provete de ensaio depende de quem o produz
Ensaio de compressão uniaxial de dois meios BTC simplesmente empilhados (junta seca) Silva (2015)	Duplica a proporção altura/largura, reduzindo a influência de forças de confinamento Procedimento de simples execução	Corte dos BTC provoca vibrações, pondo em causa a sua integridade Apenas aplicável em BTC com superfícies significativamente planas e paralelas

Analisando o Quadro 3.3, verifica-se que a resistência à compressão dos BTC é avaliada maioritariamente segundo dois procedimentos distintos: blocos inteiros ou meios blocos sobrepostos. No entanto, nos estudos em que a resistência é avaliada através do ensaio de meios blocos sobrepostos, o tipo de ligação entre os blocos também difere, ou seja, enquanto alguns autores utilizam uma argamassa de assentamento com uma composição idêntica à dos próprios blocos, outros utilizam uma argamassa de cimento e areia ou simplesmente uma pasta de cimento. Além da utilização das duas argamassas e da pasta de cimento, num dos estudos apresentados (Silva, 2015) os meios blocos são simplesmente empilhados (junta seca), uma vez que, de acordo com o autor, a utilização de argamassa entre os dois meios blocos pode subestimar o valor real da resistência à compressão.

4. PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Com a presente campanha experimental pretende-se aprofundar o conhecimento do comportamento das alvenarias de blocos de terra comprimida através da caracterização e análise de resultados de BTC e de argamassas de assentamento de terra, comparando-os com os resultados de outros investigadores e de outras alvenarias, avaliando as vantagens e desvantagens deste tipo de construção.

A campanha experimental foi realizada na Estação Experimental de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos e nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil da FCT NOVA, sendo devidamente planeada de modo a respeitar os procedimentos de ensaio e tempos de cura. As várias fases que constituem a parte experimental da presente dissertação são apresentadas de seguida.

4.1 Fase prévia

Numa primeira fase, em setembro de 2015, numa fase preparatória do *Workshop* de Blocos de Terra Comprimida, foram produzidos BTC na FCT NOVA por três estudantes de Eng. Civil e uma Arquiteta sem experiência prévia mas seguindo indicações do Arq. Miguel Rocha, com experiência vasta na produção de BTC. O material para a produção dos BTC foi constituído por 50% de solo local escavado no Campus da Caparica da FCT NOVA (solo muito siltoso, sem agregados grosseiros), 50% de areão da Charneca da Caparica e 5% de cimento Portland CEM II 32,5N - percentagens dos constituintes em volume (Quadro 4.1). A necessidade da estabilização com cimento deveu-se às características das restantes matérias-primas, que avaliadas através de ensaios expeditos, realizados *in situ* (nomeadamente de sedimentação por agitação e deposição em frasco com água), revelaram a existência de muito pouca argila.

Quadro 4.1 - Constituintes e composição volumétrica dos BTC e da argamassa de assentamento

Constituintes	Composição volumétrica
Solo	50%
Areão	50%
Cimento Portland CEM II 32,5N	Adição de 5% (do solo + areão)

A mistura foi realizada mecanicamente com o auxílio de uma betoneira de eixo horizontal onde se colocou o areão, o solo siltoso e o cimento, misturando-se os materiais até se obter uma coloração uniforme. Adicionou-se gradualmente água até se atingir a consistência desejada (húmida), perfazendo cerca de 15% da massa dos constituintes secos. Seguidamente, a mistura foi colocada sucessivamente num molde de uma prensa manual disponibilizada pelas Oficinas do Convento, Montemor-o-Novo, que a compactou, seguindo-se desmoldagem imediata do bloco produzido. Os BTC, com dimensões 140x90x295 [mm], foram empilhados e sujeitos a cura em condições de ambiente exterior.

Nesta fase, realizada no âmbito do *Workshop* de Blocos de Terra Comprimida realizado em outubro de 2015 na FCT NOVA em colaboração com a Associação Centro da Terra, num período ainda anterior ao

início da campanha experimental da presente dissertação, foram ainda construídos dois muretes (Figura 4.1), com 1,10 m de altura e 2,45 m de comprimento, sobre uma base de betão na Estação Experimental em alvenaria de BTC interligados por uma argamassa de assentamento com a mesma composição dos blocos (mas com uma quantidade de água de cerca de 35% da massa dos constituintes secos), sendo um dos muretes protegido no topo por telhas cerâmicas. Todo o processo de construção foi realizado por participantes no *Workshop*, com perfis variados, desde estudantes e Engenheiros Cívicos, Arquitetos, construtores, a maior parte sem experiência prévia na execução de alvenarias de bloco de terra, liderados pelo Arq. Miguel Rocha, coordenador do *Workshop*.



Figura 4.1 - Murete 1 (topo não protegido) e murete 2 (topo protegido por telhas cerâmicas)

4.2 Fase de caracterização experimental

De modo a avaliar a influência do teor de água nas características dos BTC, após 4 meses de cura, cobertos por um filme de polietileno, foram colocados BTC em condições *standard* ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de HR) e em condições de elevada HR ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $90\pm 5\%$ de HR) até atingirem massa constante.

Nesta segunda fase foi produzida uma argamassa de assentamento de terra formulada com a mesma composição dos blocos. Os constituintes foram colocados num recipiente e procedeu-se à sua mistura contínua com recurso a um misturador elétrico de pás, introduzindo-se água na mistura até se atingir a consistência desejada, perfazendo cerca de 35% da massa dos constituintes secos (Figura 4.2 - à esquerda).

A argamassa foi caracterizada no estado fresco e foram produzidos provetes prismáticos de argamassa em moldes metálicos com $40\times 40\times 160$ [mm] (Figura 4.2 - ao centro) e provetes circulares em moldes de PVC com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura sobre uma base impermeável.

De modo a avaliar a influência do tipo de cura, foram colocados seis provetes prismáticos e três provetes circulares em condições de cura *standard* ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de HR) e outros tantos em condições de cura húmida ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $90\pm 5\%$ de HR).

Com os BTC produzidos anteriormente e a argamassa de assentamento, construíram-se cinco provetes para avaliação da resistência à compressão, constituídos por dois blocos inteiros e dois meios blocos

(Figura 4.2 - à direita), sujeitos a cura em condições de ambiente exterior, sendo posteriormente colocados em condições *standard* até atingirem massa constante.



Figura 4.2 - Mistura da argamassa de assentamento (à esq.); Provetes prismáticos de argamassa (ao cent.); Provete para avaliar resistência à compressão (à dir.)

Realizou-se, em condições laboratoriais, a caracterização da argamassa de assentamento no estado endurecido e dos BTC, onde se inserem os ensaios aos provetes prismáticos de 40x40x160 [mm], aos provetes circulares com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, aos blocos inteiros e aos cinco provetes de alvenaria de BTC construídos para o ensaio de resistência à compressão.

Foram produzidos oito provetes, para determinação da resistência à compressão, constituídos por dois meios blocos sobrepostos. Em metade dos provetes de ensaio, a argamassa que interliga os dois meios blocos foi produzida com a mesma formulação dos BTC; nos restantes provetes, os dois meios blocos foram interligados por uma argamassa de cimento e areia, com traço 1:5 em volume, como referido na norma NTC 5324 (ICONTEC, 2004).

A campanha experimental foi concluída com a avaliação *in situ* das características dos dois muretes, construídos na Estação Experimental na primeira fase, de modo a obter uma caracterização dos BTC e da argamassa de assentamento mais próxima da realidade.

4.3 Caracterização da argamassa de assentamento

4.3.1 Ensaios no estado fresco

A amassadura e caracterização da argamassa de terra estabilizada no estado fresco realizaram-se em janeiro de 2016 de acordo com os ensaios apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Ensaios realizados à argamassa de assentamento no estado fresco e normas de ensaio

Ensaio	Norma de ensaio
Consistência por espalhamento	EN 1015-3 (CEN, 1999a)
Consistência por penetrómetro	EN 1015-4 (CEN, 1998b)
Massa volúmica	EN 1015-6 (CEN, 2006b)
Teor de ar	EN 1015-7 (CEN, 1998c)

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

Como já referido anteriormente, em janeiro de 2016 quando se caracterizou a argamassa no estado fresco, foram também produzidos provetes prismáticos de argamassa com 40x40x160 [mm] em moldes metálicos e provetes circulares com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, em moldes de PVC, para caracterização no estado endurecido da argamassa de assentamento de terra estabilizada.

Os provetes da argamassa de assentamento produzidos foram caracterizados após 7 e 28 dias de cada condição de cura, de acordo com os ensaios apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Ensaios realizados no estado endurecido e normas de ensaio

Ensaio	Tipo de material	Norma de ensaio
Massa volúmica aparente	Provetes prismáticos de argamassa	DIN 18946 (NABau, 2013a)
Módulo de elasticidade dinâmico	Provetes prismáticos de argamassa	NP EN 14146 (IPQ, 2006)
Resistência à tração por flexão	Provetes prismáticos de argamassa	EN 1015-11 (CEN, 1999b)
Resistência à compressão	Meios provetes prismáticos de argamassa	DIN 18946 (NABau, 2013a), EN 1015-11 (CEN, 1999b)
Condutibilidade térmica	Provetes circulares de argamassa	Manual do equipamento

O módulo de elasticidade dinâmico apenas foi determinado para os provetes prismáticos em cura *standard*, uma vez que a presença de água nos provetes leva a perturbações que afetam o valor real deste parâmetro. No caso da condutibilidade térmica, o ensaio apenas foi realizado aos 28 dias em ambas em condições de cura, já que os valores que se obteriam aos 7 dias seriam bastante influenciados pelo pouco tempo de cura decorrido.

4.4 Caracterização de um tipo de bloco de terra comprimida

Tal como os provetes da argamassa de assentamento, também os blocos foram colocados em condições *standard* e de elevada humidade relativa aos 4 meses de idade (após o processo de cura em ambiente exterior), de modo a avaliar a influência do teor de água nas suas características.

Uma das propriedades fundamentais na caracterização de blocos de terra é a resistência à compressão. No entanto, atualmente não existe consenso quanto ao melhor método de ensaio para a determinação deste parâmetro (Aubert et al., 2015). Tendo isso em conta, foram adotados vários procedimentos de ensaio para avaliar a resistência à compressão dos BTC.

Os BTC e provetes de ensaio foram mantidos nas condições referidas anteriormente até atingirem massa constante sendo após isso, caracterizados de acordo com os ensaios apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Ensaios realizados aos blocos e normas de ensaio

Ensaio	Tipo de provete	Condição de cura	Norma ou procedimento de ensaio
Massa volúmica aparente	Bloco inteiro	<i>Standard e elevada HR</i>	DIN 18945 (NABau, 2013b), UNE 41410 (AENOR, 2008)
Resistência à compressão	Bloco inteiro na horizontal	<i>Standard e elevada HR</i>	DIN 18945 (NABau, 2013b), UNE 41410 (AENOR, 2008)
	Bloco inteiro na vertical	<i>Standard e elevada HR</i>	Aubert et al. (2015)
	Dois meios blocos sobrepostos interligados com argamassa de cimento e areia	<i>Standard</i>	NTC 5324 (ICONTEC, 2004)
	Dois meios blocos sobrepostos interligados com argamassa com a mesma composição	<i>Standard</i>	Morel et al. (2007)
	Provetes de alvenaria constituídos por dois blocos inteiros e dois meios blocos interligados com argamassa com a mesma composição	<i>Standard</i>	Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009)

4.5 Caracterização *in situ* de alvenarias de blocos de terra comprimida

Com o objetivo de obter uma caracterização das alvenarias de BTC mais próxima da realidade, em fevereiro de 2016 foram realizados os ensaios apresentados no Quadro 4.5 em dois muretes com as faces principais orientadas a Sul e Norte.

Quadro 4.5 - Ensaios realizados *in situ* e normas de ensaio

Ensaio	Face de ensaio	Norma de ensaio
Condutibilidade térmica	Topo	Manual do equipamento
<i>Martinet-Baronnie</i>	Norte e Sul	FE Pa 25 (LNEC, 1980)
Resistência superficial por esclerómetro pendular	Norte e Sul	ASTM C805 (ASTM, 2008)
Velocidade de propagação de ultrassons	Sul	FE Pa 43 (LNEC, 2010) NP EN 12504-4 (IPQ, 2007)
Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	Sul	FE Pa 39 (LNEC, 2002) EN 16302 (CEN, 2013)

Esta etapa da campanha experimental, realizada *in situ*, teve em conta alguns fatores que poderiam afetar as características dos BTC e da argamassa de assentamento que constituem os muretes, nomeadamente a ação da chuva, a orientação solar e a humidade ascensional. Devido aos fatores mencionados, os ensaios foram realizados antes (situação seca) e após um período de precipitação, a cotas distintas, sendo que a deformabilidade (*Martinet-Baronnie*) e a resistência superficial por esclerómetro pendular foram avaliadas em ambas as faces dos muretes da Estação Experimental enquanto a restante caracterização foi realizada apenas na face Sul.

De modo a ter em conta a influência da HR e temperatura do ar nos resultados, foram ainda registados os valores em ambas as faces para diferentes períodos da manhã em que decorreram os ensaios. Os valores de HR e temperatura registados são apresentados no Quadro 4.6, onde se constata que após o período de precipitação a HR é menor. No dia da realização dos ensaios antes da ocorrência de um período de precipitação, o céu encontrava-se nublado e fazia-se notar a ação do vento. No entanto, no dia dos ensaios realizados após o período de precipitação, o céu encontrava-se limpo e a ação do vento era praticamente nula. Este facto pode em parte explicar a menor HR verificada.

Quadro 4.6 - Condições de HR e temperatura durante realização de ensaios *in situ*

Murete	Face	Hora	Antes de período de precipitação		Após período de precipitação	
			T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
1	Norte	11h:51min	17	81	11	69
	Sul	12h:06min	23	68	13	58
2	Norte	11h:06min	15	82	10	66
	Sul	10h:16min	17	76	13	58

5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Argamassa no estado fresco

5.1.1 Consistência por espalhamento

Descrição do ensaio

A consistência por espalhamento permite aferir e quantificar a trabalhabilidade das argamassas em estado fresco. O ensaio foi realizado tendo por base a norma europeia EN 1015-3 (CEN, 1999a) mas utilizando uma mesa de espalhamento que não está de acordo com a última versão desta norma.

Antes de iniciar o ensaio, a mesa de espalhamento, o molde troncocónico e o pilão foram humedecidos com um pano húmido. Colocou-se o molde no centro da mesa e introduziu-se a argamassa de terra estabilizada em duas camadas, sendo cada uma compactada com um mínimo de 10 inserções do pilão de forma a eliminar os vazios, garantindo a uniformidade da argamassa. Rasou-se a superfície do molde para retirar a argamassa em excesso e retirou-se cuidadosamente o molde. Deram-se 15 pancadas em 15 segundos, por rotação da manivela da mesa, com o ritmo de uma pancada por segundo, após as quais se mediu com o auxílio de uma craveira o diâmetro da argamassa espalhada em quatro direções ortogonais.



Figura 5.1 - Procedimento de realização do ensaio de consistência por espalhamento

Apresentação de resultados

O valor médio de $157,5 \pm 2,8$ mm para a consistência por espalhamento resultou da média aritmética das oito medições obtidas através do ensaio realizado em duas amostras da mesma amassadura.

5.1.2 Consistência por penetrómetro

Descrição do ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-4 (CEN, 1998b), recorrendo a um equipamento denominado penetrómetro, constituído por uma haste vertical, na extremidade da qual está fixo um êmbolo com uma determinada massa (Figura 5.2 - à esquerda).

Preencheu-se um recipiente normalizado (Figura 5.2 - à direita) com a argamassa fresca em duas camadas, cada uma compactada com 10 inserções do pilão de forma a eliminar os vazios, garantindo a uniformidade da argamassa. Seguidamente removeu-se o excesso de argamassa e deixou-se cair a haste do equipamento sobre a argamassa, medindo-se de seguida a profundidade de penetração.



Figura 5.2 - Penetrômetro com haste vertical e êmbolo na extremidade (à esq.); recipiente normalizado (à dir.)

Apresentação de resultados

A consistência da argamassa de terra estabilizada resulta da média aritmética das três medições obtidas através dos três ensaios realizados para a mesma amassadura, tendo sido obtido o valor de $1,3 \pm 0,05$ cm.

5.1.3 Massa volúmica da argamassa fresca

Descrição do ensaio

Com o objetivo de avaliar a massa volúmica da argamassa de terra estabilizada no estado fresco, realizou-se o ensaio com base na norma EN 1015-6 (CEN, 2006b).

Colocou-se um recipiente cilíndrico com 1 dm^3 de capacidade numa balança de precisão 0,1 g e tarou-se a balança. De seguida, preencheu-se o recipiente com argamassa até metade da sua capacidade e compactou-se através da oscilação em quatro direções alternadas (Figura 5.3 - à esquerda). Deixando o recipiente de um lado apoiado, levantou-se do lado oposto a uma altura de 3 cm e deixou-se cair, repetindo-se este processo para cada uma das restantes três direções. Após esse procedimento, preencheu-se por completo o recipiente e voltou a compactar-se do mesmo modo. Por fim rasou-se a argamassa em excesso e pesou-se o conjunto argamassa e recipiente.

Apresentação de resultados

A massa volúmica da argamassa de assentamento no estado fresco consiste assim na medição da massa de uma amostra da amassadura, tendo sido obtido o valor de $1,99 \text{ kg/dm}^3$.

5.1.4 Teor de ar

Descrição do ensaio

A determinação do teor de ar da argamassa de terra no estado fresco teve por base a norma europeia EN 1015-7 (CEN, 1998c).

Fixou-se o equipamento de medição ao recipiente utilizado para o ensaio de massa volúmica no estado fresco preenchido com argamassa através de grampos metálicos, incluídos no equipamento (Figura 5.3 - à direita). Para expulsar o ar no interior, com as duas válvulas do dispositivo abertas, introduziu-se água

no sistema por uma das aberturas até que saísse pela outra válvula. Após o sistema estar preenchido, bombeou-se ar para o reservatório até o manômetro atingir a posição zero. Fecharam-se as duas válvulas e libertou-se a válvula de escape até o ponteiro estabilizar.



Figura 5.3 - Recipiente com argamassa após compactação da primeira camada (à esq.); Equipamento para determinação do teor de ar (à dir.)

Apresentação de resultados

O resultado deste ensaio, expresso em percentagem, consiste numa única medição e é dado pela leitura no mostrador do manômetro arredondando a 0,1. No caso da argamassa de assentamento de terra estabilizada em estudo, o teor de ar obtido foi de 3,2%.

5.2 Argamassa no estado endurecido - provetes prismáticos e circulares

5.2.1 Massa volúmica aparente

Descrição do ensaio

A avaliação da massa volúmica aparente da argamassa de terra estabilizada teve por base a norma DIN 18946 (NABau, 2013a). O ensaio foi realizado em três provetes prismáticos de cada condição de cura, aos 7 e aos 28 dias.

Para a determinação deste parâmetro recorreu-se a uma craveira digital para medir as dimensões dos provetes prismáticos e a uma balança de precisão de 0,001 g para determinar a sua massa. Com estes dados foi possível proceder-se ao cálculo da massa volúmica da argamassa através do quociente entre a massa do provete e o seu volume. Tendo em conta os valores obtidos, a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) permite classificar a argamassa segundo classes de massa volúmica.

Apresentação e análise de resultados

A massa volúmica da argamassa de assentamento, para cada idade e condição de cura, resulta da média aritmética dos três valores obtidos para cada situação avaliada. Na Figura 5.4 apresentam-se os resultados obtidos.

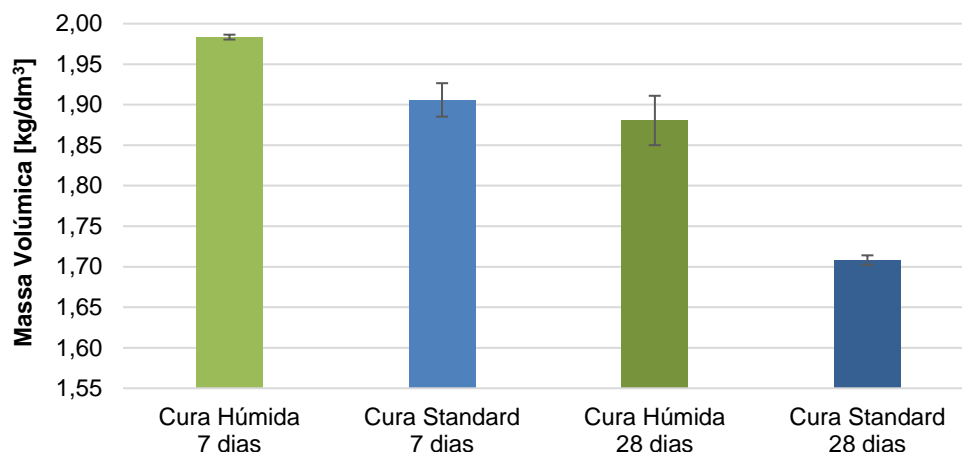


Figura 5.4 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aparente

Ao analisar os resultados obtidos é possível verificar que, tal como expectável, a cura húmida dos provetes leva a maiores valores de massa volúmica aos 7 e 28 dias, sendo essa diferença ligeiramente mais acentuada aos 28 dias. Como se trata de um processo de cura, o teor de água tende a diminuir ao longo do tempo traduzindo-se numa redução da massa do provete. No entanto, visto o processo ocorrer num ambiente de elevada humidade relativa ($90 \pm 5\%$), aliado à elevada capacidade higroscópica deste tipo de material, a diminuição do teor de água na argamassa é menor que na cura *standard*, implicando uma maior massa volúmica.

5.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Descrição do ensaio

O ensaio foi realizado em seis provetes prismáticos estabilizados na cura *standard* (três provetes aos 7 dias e três aos 28 dias), de acordo com a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006). Esta norma estabelece procedimentos para a determinação da frequência fundamental de ressonância para uma vibração induzida na direção longitudinal, permitindo quantificar a deformabilidade de um material sólido.

Cada provete foi colocado no suporte do equipamento “ZEUS Resonance Meter” (Figura 5.5) com um dos topos em contacto com o emissor de ultrassons e o outro em contacto com o recetor. No *software* de cálculo acoplado ao equipamento foram introduzidas as medidas (em milímetros) e a massa (em gramas) de cada provete e deu-se início ao ensaio. Seguidamente registaram-se as leituras do módulo de elasticidade dinâmico, determinado automaticamente pelo equipamento, e rodou-se o provete de modo a obter quatro medições para cada um. Realizaram-se doze ensaios para cada tipo de cura.

O programa determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico E_{din} , expresso em N/mm^2 , com base na equação 5.1.

$$E_{din} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (5.1)$$

Nesta equação, L - comprimento do provete [m]; f_0 - frequência de ressonância longitudinal [Hz]; ρ - peso específico [N/m^3]; g - aceleração gravítica [$9,80665 \text{ m/s}^2$].

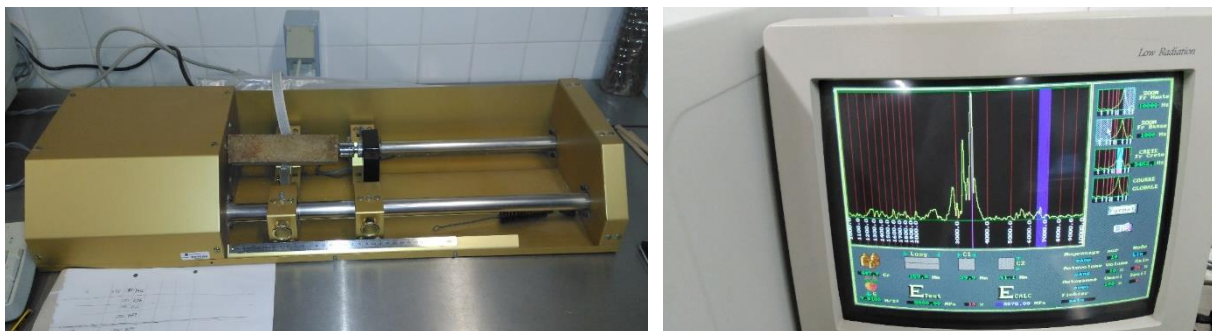


Figura 5.5 - Equipamento “ZEUS Resonance Meter” e aspeto do *software* de cálculo

Apresentação e análise de resultados

O módulo de elasticidade dinâmico, obtido através da média aritmética das quatro medições realizadas em cada um dos três provetes aos 7 e 28 dias, é de 2354 ± 155 N/mm² e 2048 ± 81 N/mm² respetivamente.

Comparando os resultados obtidos aos 7 e 28 dias, verifica-se que com o aumento do tempo de cura, o módulo de elasticidade diminuiu um pouco, bem como o desvio padrão associado. Este menor módulo de elasticidade aliado a uma menor dispersão de valores resulta da diminuição do teor de água dos provetes devido ao processo de cura.

5.2.3 Resistência à tração por flexão

Descrição do ensaio

A resistência à tração por flexão foi avaliada, de acordo com a norma EN 1015-11 (CEN, 1999b), em três provetes prismáticos de cada cura aos 7 e aos 28 dias, com uma máquina de tração Zwick-Rowell Z050 com uma célula de carga de 2 kN (Figura 5.6 - à esquerda).

O ensaio consistiu na aplicação de uma carga com velocidade de 0,2 mm/min a meio vão do provete, apoiado em dois pontos distanciados por 100 mm (Figura 5.6 - à direita), tendo-se o cuidado de colocar a face mais rugosa disposta lateralmente de forma a permitir que a carga atuasse numa superfície lisa, sem irregularidades, de modo a não influenciar os resultados. A rotura do provete marcou o final do ensaio, sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de tração F_t [N].

A resistência à tração por flexão R_t , expressa em N/mm², é determinada através de equação 5.2.

$$R_t = \frac{1,5 \times F_t \times L}{b^3} \quad (5.2)$$

Nesta equação, F_t - força máxima de tração [N]; L - distância entre apoios, em milímetros [100 mm]; b - lado da seção quadrada do provete prismático, em milímetros [40 mm].

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 5.7 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à tração por flexão da argamassa de assentamento de terra estabilizada.

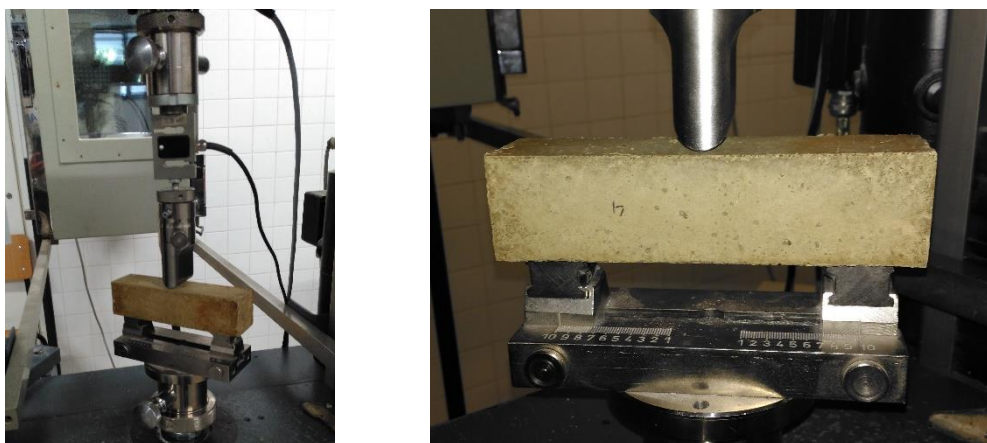


Figura 5.6 - Ensaio de resistência à tração por flexão (à esq.); Provete apoiado em dois pontos distanciados por 100 mm (à dir.)

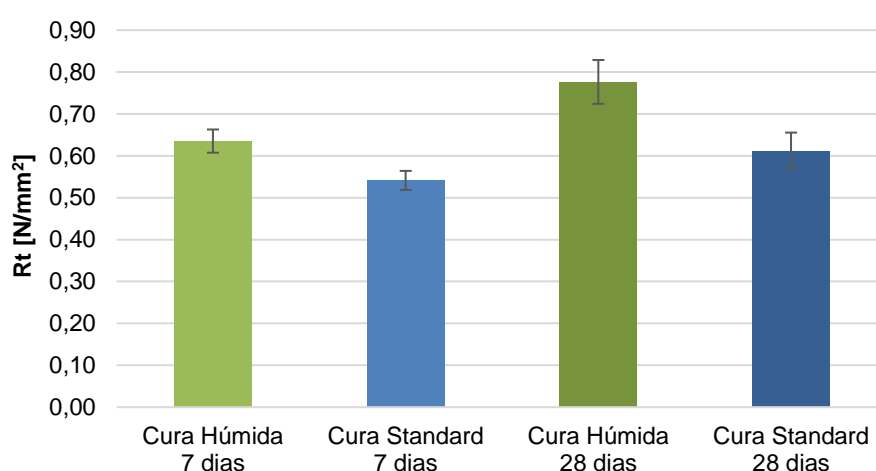


Figura 5.7 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão

Ao analisar os resultados obtidos aos 7 e 28 dias para a resistência à tração por flexão é possível verificar que a argamassa em condições de cura húmida apresentou valores de resistência superiores. A maior resistência verificada na argamassa em cura húmida pode ser explicada pelo aumento do teor em água levar a um aumento da deformabilidade e da capacidade de distribuição da tensão.

5.2.4 Resistência à compressão

Descrição do ensaio

O ensaio para determinação da resistência à compressão da argamassa de terra foi realizado de acordo com as normas DIN 18946 (NABau, 2013a) e EN 1015-11 (CEN, 1999b), nas doze metades resultantes dos seis provetes do ensaio de resistência à tração por flexão aos 7 e aos 28 dias, com o mesmo equipamento mas com uma célula de carga de 50 kN.

Colocou-se cada um dos meios provetes num suporte metálico com secção 40x40 [mm] que garante o contacto eficaz entre a prensa e o provete, tendo o cuidado de o posicionar com a face mais rugosa disposta lateralmente de forma a permitir que a carga atuasse numa superfície lisa, sem irregularidades,

de modo a não influenciar os resultados (Figura 5.8 - à esquerda). Após o posicionamento do suporte metálico entre os pratos da prensa, aplicou-se uma carga com velocidade de 0,7 mm/min. A rotura do meio provete marcou o final do ensaio (Figura 5.8 - à direita), sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de compressão F_c [N].

A resistência à compressão R_c [N/mm²] resulta do quociente entre a força máxima de compressão F_c [N] e a área da secção comprimida [1600 mm²].



Figura 5.8 - Ensaio de resistência à compressão (à esq.); Rotura do meio provete (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 5.9 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à compressão da argamassa de assentamento de terra estabilizada.

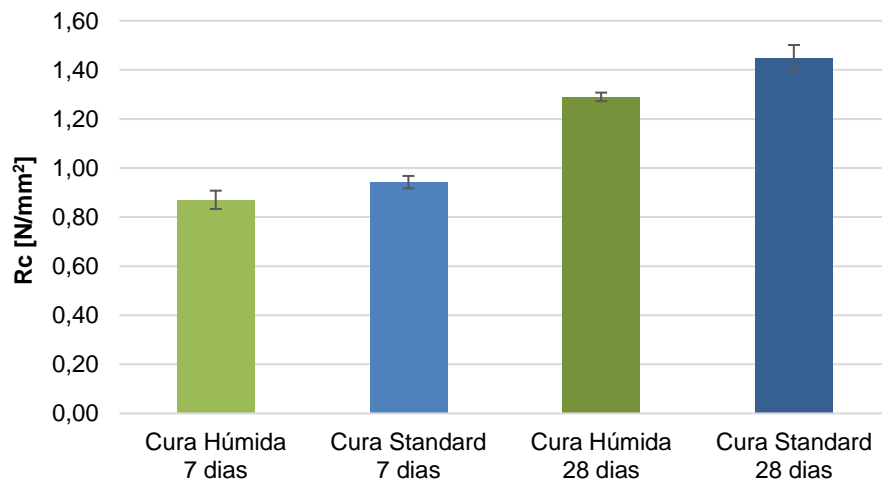


Figura 5.9 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão

Os valores resultantes do ensaio de resistência à compressão mostram que, aos 7 e 28 dias, a argamassa em condições de cura *standard* apresentou valores de resistência superiores, podendo esta superioridade ser explicada pelo facto de um menor teor de água da argamassa nestas condições de cura levar ao aumento da rigidez e, consequentemente, ao aumento da resistência à compressão.

5.2.5 Condutibilidade térmica

Descrição do ensaio

A condutibilidade térmica (λ) é uma característica própria de cada material, que traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura (Henriques, 2011).

O ensaio foi realizado com base no manual do equipamento, o ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) (Figura 5.10 - à esquerda) e uma sonda de superfície API 210412 de 6 cm de diâmetro, com intervalo de medições de 0,3-2,0 W/(m°C), em três provetes circulares de cada cura com 28 dias.

Para garantir condições de fronteira homogêneas, os provetes circulares de argamassa foram colocados sobre uma placa de XPS, para que o calor não se dissipasse através da mesa de apoio. A sonda foi colocada sobre os provetes e iniciou-se o ensaio (Figura 5.10 - à direita). Após a emissão de um fluxo de calor através da sonda durante um certo período de tempo, o equipamento avaliou a resposta da argamassa em estudo, fornecendo o valor da condutibilidade térmica.



Figura 5.10 - Equipamento ISOMET 2104 (à esq.); Ensaio de condutibilidade térmica, com sonda API 210412, sobre provete circular de argamassa (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

A condutibilidade térmica da argamassa de terra estabilizada foi obtida através da média aritmética dos três resultados fornecidos pelo equipamento para cada condição de cura, tendo sido obtidos para os provetes em cura húmida e cura *standard*, os valores de $0,98 \pm 0,04$ W/(m°C) e $0,69 \pm 0,02$ W/(m°C), respetivamente.

Ao analisar os resultados obtidos é possível verificar que, tal como em outras características avaliadas, o tipo de cura também influencia a condutibilidade térmica. O elevado potencial higroscópico dos materiais de terra, aliado a uma cura em ambiente de elevada humidade relativa ($90 \pm 5\%$), leva a maiores valores de condutibilidade térmica devido ao maior teor de água dos provetes de argamassa nestas condições de cura.

5.3 Ensaios de caracterização dos BTC produzidos

5.3.1 Massa volúmica aparente

Descrição do ensaio

A massa volúmica aparente foi determinada, para nove blocos de terra comprimida em condições *standard* e outros tantos em condições de elevada humidade relativa, de acordo com as normas DIN 18945 (NABau, 2013b) e UNE 41410 (AENOR, 2008).

O ensaio foi realizado com recurso a uma craveira digital para medir as dimensões dos BTC e a uma balança de precisão de 0,1 g para determinar a sua massa. A massa volúmica aparente resulta do quociente entre a massa de cada bloco e o seu volume. Tendo em conta os resultados obtidos, a norma DIN 18945 (NABau, 2013b) permite classificar os BTC segundo classes de massa volúmica.

Apresentação e análise de resultados

A massa volúmica aparente dos BTC, em condições *standard* e de elevada humidade relativa, foi obtida através da média aritmética dos nove valores resultantes das duas situações avaliadas. Os valores médios e desvios padrão são de $1,81 \pm 0,06 \text{ kg/dm}^3$ e $1,80 \pm 0,06 \text{ kg/dm}^3$ para os BTC em condições *standard* e de elevada HR, respetivamente. Com a ressalva dos BTC serem estabilizados e a norma se limitar a não estabilizados, de acordo com a norma DIN (NABau, 2013b) seriam classificados na classe 1,8, uma vez que apresentam valores entre 1,61 e $1,80 \pm 0,1 \text{ kg/dm}^3$.

Ao analisar os resultados, verifica-se que a massa volúmica obtida em condições *standard* e de elevada HR é praticamente idêntica; no entanto, seria expectável que em condições de elevada HR a massa volúmica fosse superior devido à possibilidade dos BTC adsorverem maior teor de água. Este facto pode ser justificado pelos pequenos destacamentos, visíveis em arestas de alguns blocos em condições de elevada HR, implicarem uma diminuição da massa, não tendo sido feita, no entanto, uma correção ao volume do bloco.

5.3.2 Resistência à compressão - DIN 18945 e UNE 41410

Descrição do ensaio

O ensaio para determinação da resistência à compressão dos BTC (Figura 5.11 - à esquerda) foi realizado de acordo com as normas DIN 18945 (NABau, 2013b) e UNE 41410 (AENOR, 2008), em sete blocos em condições *standard* e outros tantos em condições de elevada humidade relativa, com recurso a uma máquina universal Zwick/Rowell Z050 com uma célula de carga de 50 kN.

Segundo a norma espanhola (AENOR, 2008) a resistência à compressão pode ser aferida diretamente sobre um bloco inteiro, sendo o mesmo indicado pela norma alemã (NABau, 2013b) para BTC com uma altura superior a 71 mm.

Colocou-se cada um dos blocos entre duas chapas metálicas com secção de 167x167 [mm], garantindo assim o contacto eficaz entre a prensa e o bloco. Após o posicionamento das chapas e do bloco entre os

pratos da prensa, aplicou-se uma carga com velocidade de 0,7 mm/min. A rotura do bloco marcou o final do ensaio (Figura 5.11 - à direita), sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de compressão F_c [N].

A resistência à compressão R_c [N/mm²] resulta do quociente entre a força máxima de compressão F_c [N] e a área da secção comprimida 140x167 [mm²].



Figura 5.11 - Ensaio de resistência à compressão (à esq.); Rotura do bloco com formação de cone de compressão (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

A resistência à compressão dos BTC, em condições *standard* e de elevada humidade relativa, foi obtida através da média aritmética dos sete valores resultantes das duas situações avaliadas. Os valores médios e desvios padrão são de $1,38 \pm 0,24$ N/mm² e $0,88 \pm 0,10$ N/mm² para os BTC em condições *standard* e de elevada HR, respetivamente.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostram que os blocos em condições *standard* de temperatura e HR apresentam valores de resistência superiores aos que foram mantidos em ambiente húmido. Os valores superiores de resistência à compressão podem em parte ser explicados pelo menor teor de água dos blocos em condições *standard* traduzir-se num aumento da rigidez e, consequentemente, no aumento da resistência à compressão.

5.3.3 Resistência à compressão - NTC 5324

Descrição do ensaio

A resistência à compressão foi também determinada segundo a norma NTC 5324 (ICONTEC, 2004), através da compressão de quatro provetes de ensaio recorrendo a uma máquina universal Zwick/Rowell Z050 com uma célula de carga de 50 kN.

Cada provete de ensaio foi preparado de acordo com a norma NTC 5324 (ICONTEC, 2004), conforme a seguinte descrição:

- Cortou-se o bloco com o auxílio de uma rebarbadora elétrica, perpendicularmente à sua maior dimensão, obtendo-se dois meios blocos;

- Preparou-se uma argamassa de cimento e areia (traço 1:5 em volume) com o auxílio de um misturador elétrico de pás, adicionando-se água até atingir a consistência desejada;
- Colocou-se um dos meios blocos dentro de um recipiente com água, até ficar submerso, e retirou-se imediatamente colocando-o sobre a mesa de apoio;
- Aplicou-se a argamassa previamente preparada sobre o meio bloco, formando uma camada com cerca de 1 cm;
- Assentou-se o segundo meio bloco após ser submerso como já havia sido feito para o primeiro, tendo o cuidado de deixar as faces que foram cortadas em direções opostas, de manter a espessura da argamassa de assentamento e de garantir o perfeito nivelamento dos meios blocos com o auxílio de um nível de bolha;
- Os quatro provetes produzidos foram colocados em condições *standard* ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de HR).

Após 28 dias em condições *standard* de temperatura e HR, colocou-se cada um dos provetes entre duas chapas metálicas com secção de 167×167 [mm] (Figura 5.12), garantindo assim o contacto eficaz entre a prensa e os meios blocos. Após o posicionamento das chapas e do provete entre os pratos da prensa, aplicou-se uma carga com velocidade de 0,7 mm/min. A rotura dos meios blocos sobrepostos marcou o final do ensaio, sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de compressão F_c [N].

A resistência à compressão R_c [N/mm^2] resulta do quociente entre a força máxima de compressão F_c [N] e a área da secção comprimida [mm^2].



Figura 5.12 - Colocação entre duas chapas metálicas para garantir contacto eficaz

Apresentação e análise de resultados

A resistência à compressão dos BTC resulta da média aritmética dos quatro valores obtidos para os provetes ensaiados, tendo sido obtido o valor de $0,62\pm 0,10$ N/mm^2 .

A resistência à compressão obtida através deste método é inferior à determinada no ensaio referido em 5.3.2. Esta menor resistência pode ser explicada por vários fatores, como a integridade dos meios blocos

estar em causa (visto o corte a seco provocar vibrações no BTC), a utilização de uma argamassa de cimento comum apresentar pouca compatibilidade com os BTC introduzindo forças de confinamento devido ao maior teor de ligante e o ensaio direto dos blocos inteiros na horizontal poder também introduzir forças de confinamento que se traduzem numa resistência superior à real.

5.3.4 Resistência à compressão - BTC ensaiado na vertical

Descrição do ensaio

De acordo com Aubert et al. (2015), a melhor metodologia para avaliar a resistência à compressão dos BTC consiste em ensaiar os blocos inteiros na vertical diretamente entre os pratos da prensa. A colocação do bloco na vertical permite que a razão entre a altura e a largura aumente, diminuindo assim significativamente as forças de confinamento, obtendo-se um valor mais próximo da resistência real.

Após permanecerem em condições *standard* e de elevada humidade relativa até atingirem massa constante, sete blocos de cada condição de cura foram sujeitos ao ensaio direto na vertical (Figura 5.13 - à esquerda). Colocou-se cada um dos blocos entre duas chapas metálicas com secção de 142x142 [mm], garantindo assim o contacto eficaz entre a prensa e o bloco. Após o posicionamento das chapas e do bloco entre os pratos da máquina universal Zwick/Rowell Z050 com uma célula de carga de 50 kN, aplicou-se uma carga com velocidade de 0,7 mm/min. A rotura do bloco marcou o final do ensaio (Figura 5.13 - à direita), sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de compressão F_c [N].

A resistência à compressão R_c [N/mm²] resulta do quociente entre a força máxima de compressão F_c [N] e a área da secção comprimida 140x90 [mm²].



Figura 5.13 - Ensaio de compressão axial do bloco na vertical (à esq.); Rotura do bloco com formação de fissura vertical (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

A resistência à compressão dos BTC, em condições *standard* e de elevada humidade relativa, foi obtida através da média aritmética dos sete valores resultantes das duas situações avaliadas. Os valores

médios e desvios padrão são de $0,46 \pm 0,10 \text{ N/mm}^2$ e $0,51 \pm 0,14 \text{ N/mm}^2$ para os BTC em condições *standard* e de elevada HR, respetivamente.

A resistência à compressão obtida através do ensaio de compressão axial do BTC na vertical é inferior aos resultados alcançados através dos ensaios referidos em 5.3.2 e 5.3.3. A menor resistência verificada pode em parte ser explicada pelo facto de, segundo Aubert et al. (2015), esta metodologia ser indicada para blocos obtidos por extrusão e não por compressão em prensa manual, como é o caso dos BTC em estudo.

De salientar ainda que, no caso do ensaio direto dos BTC na vertical, o valor da resistência à compressão para os blocos em condições de elevada HR foi ligeiramente superior ao obtido para os blocos em condições *standard*, contrariamente ao que se havia verificado quando ensaiados de acordo com o descrito em 5.3.2. Esta diferença pode em parte dever-se ao facto do comprimento do bloco permitir uma ligeira flexão e, nesse caso, os BTC com maior deformabilidade resultante do maior teor em água apresentarem uma maior resistência.

5.3.5 Resistência à compressão - Meios BTC e argamassa com a mesma composição

Descrição do ensaio

Segundo a norma NTC 5324 (ICONTEC, 2004), a resistência à compressão dos BTC deve ser avaliada através da compressão de provetes constituídos por dois meios blocos sobrepostos interligados por uma junta de argamassa de cimento e areia. No entanto, um estudo realizado por Morel et al. (2007) define um procedimento de ensaio semelhante diferindo na composição da argamassa que interliga os dois meios blocos. Segundo o autor a argamassa de assentamento deve ser compatível física e mecanicamente com os BTC, sendo que normalmente a argamassa mais compatível apresenta uma composição idêntica à do próprio bloco.

Tendo em conta o referido acima, foram preparados e ensaiados quatro provetes de acordo com o descrito em 5.3.3 (Figura 5.14), sendo os meios blocos interligados por uma argamassa de assentamento produzida com a mesma formulação dos BTC (50% de solo local, 50% de areão e 5% de cimento).



Figura 5.14 - Rotura do provete com argamassa com a mesma composição durante ensaio de resistência à compressão

Apresentação e análise de resultados

A resistência à compressão dos BTC resulta da média aritmética dos quatro valores obtidos para os provetes ensaiados, tendo sido obtido o valor de $0,48 \pm 0,03 \text{ N/mm}^2$.

Analisando os resultados verifica-se que para o mesmo tempo de cura, os provetes constituídos por dois meios blocos e argamassa de assentamento de terra estabilizada apresentam uma resistência inferior aos interligados por uma argamassa de cimento e areia. Esta menor resistência pode dever-se ao facto da argamassa de cimento e areia apresentar uma maior percentagem de cimento e, sendo assim, os valores de resistência obtidos para os blocos serem sobrevalorizados pela resistência da própria argamassa de assentamento.

A resistência à compressão obtida através do ensaio de dois meios blocos sobrepostos interligados por argamassa de terra estabilizada é inferior à determinada no ensaio descrito em 5.3.2, podendo, tal como no ensaio referido em 5.3.3, esta menor resistência ser motivada por vários fatores como, a integridade dos meios blocos estar em causa devido ao tipo de corte e o ensaio direto dos blocos inteiros na horizontal entre os pratos da prensa poder introduzir forças de confinamento que se traduzem numa resistência superior à real.

5.3.6 Resistência à compressão - Provetes de alvenaria

Descrição do ensaio

Com base no estudo realizado por Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009), de modo a avaliar a resistência à compressão das alvenarias de BTC, foram produzidos cinco provetes constituídos por dois blocos inteiros e dois meios blocos, interligados por uma argamassa de assentamento com a mesma formulação dos BTC, conforme a seguinte descrição:

- Cortaram-se blocos com o auxílio de uma rebarbadora elétrica, perpendicularmente à sua maior dimensão, obtendo-se meios blocos;
- Preparou-se uma argamassa com a mesma composição dos blocos (50% de solo local, 50% de areão e 5% de cimento, em volume) com o auxílio de um misturador elétrico de pás, adicionando-se água até atingir a consistência desejada;
- Colocou-se um bloco dentro de um recipiente com água, até ficar submerso (Figura 5.15 - à esquerda), e retirou-se imediatamente colocando-o sobre uma base de apoio;
- Aplicou-se a argamassa previamente preparada sobre o bloco, formando uma camada com cerca de 1 cm;
- Repetiu-se o procedimento de imersão para dois meios blocos, sendo após essa ação colocados sobre a argamassa realizando-se pressão para nivelar;
- Preencheu-se a junta entre os dois meios blocos com a argamassa de terra estabilizada (Figura 5.15 - ao centro);
- Aplicou-se a argamassa de assentamento sobre os dois meios blocos, formando uma camada com cerca de 1 cm (Figura 5.15 - à direita);
- Repetiu-se o procedimento de imersão para um bloco inteiro que foi, após essa ação, colocado sobre a argamassa, realizando-se pressão para nivelar.



Figura 5.15 - Imersão do bloco em água (à esq.); Preenchimento da junta entre os dois meios blocos com argamassa (ao cent.); aplicação de uma camada de argamassa sobre os meios blocos (à dir.)

Após o processo de cura em ambiente exterior os cinco provetes foram colocados em condições *standard* ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de HR) até atingirem massa constante, permitindo assim a realização do ensaio para avaliar a resistência à compressão (Figura 5.16 - à esquerda).

Colocou-se cada um dos cinco provetes entre duas chapas metálicas com secção de 300×500 [mm], garantindo assim o contacto eficaz entre a prensa e o provete. Após o posicionamento das chapas e do provete entre os pratos da máquina universal Zwick/Rowell Z050 com uma célula de carga de 50 kN, aplicou-se uma carga com velocidade de 0,7 mm/min. A rotura do provete marcou o final do ensaio (Figura 5.16 - à direita), sendo registado no gráfico força-deslocamento, traçado pelo *software* do equipamento, a força máxima de compressão F_c [N].

A resistência à compressão R_c [N/mm^2] resulta do quociente entre a força máxima de compressão F_c [N], à qual se somou a carga adicional resultante da colocação da chapa metálica com massa considerável sobre o provete, e a área da secção comprimida 140×295 [mm^2].



Figura 5.16 - Ensaio de resistência à compressão do provete (à esq.); Rotura do provete com formação de fissuras verticais (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

A resistência à compressão das alvenarias de BTC resulta da média aritmética dos cinco valores obtidos para os provetes ensaiados, tendo sido obtido o valor de $0,52 \pm 0,10 \text{ N/mm}^2$.

Os resultados obtidos são semelhantes aos verificados aquando da realização do ensaio em dois meios blocos sobrepostos interligados por argamassa de assentamento de terra estabilizada. Este facto demonstra, assim, que o procedimento descrito em 5.3.5 pode ser bastante representativo quando existe necessidade de avaliar a resistência à compressão de paredes constituídas pelos blocos e argamassa ensaiados.

Verifica-se também que os resultados são inferiores aos obtidos através do ensaio realizado diretamente sobre o bloco na horizontal, indicando mais uma vez que este tipo de ensaio, devido à altura do bloco, pode introduzir forças de confinamento que se traduzem num valor superior à resistência real do BTC.

5.4 Ensaio de caracterização da alvenaria de BTC realizados *in situ*

5.4.1 Condutibilidade térmica

Descrição do ensaio

O ensaio para avaliar a condutibilidade térmica (Figura 5.17 - à esquerda) foi realizado com base no manual do equipamento, com recurso ao mesmo aparelho e sonda utilizados na caracterização da argamassa: ISOMET 2104 e API 210412 de 6 cm de diâmetro (Figura 5.17 - à direita). Foi aplicado em cinco pontos no topo dos muretes 1 e 2 (Figura 5.18), antes e após um período de precipitação.

Após a emissão de um fluxo de calor através da sonda durante um certo período de tempo, o equipamento avaliou a resposta dos muretes em estudo, fornecendo o valor da condutibilidade térmica.

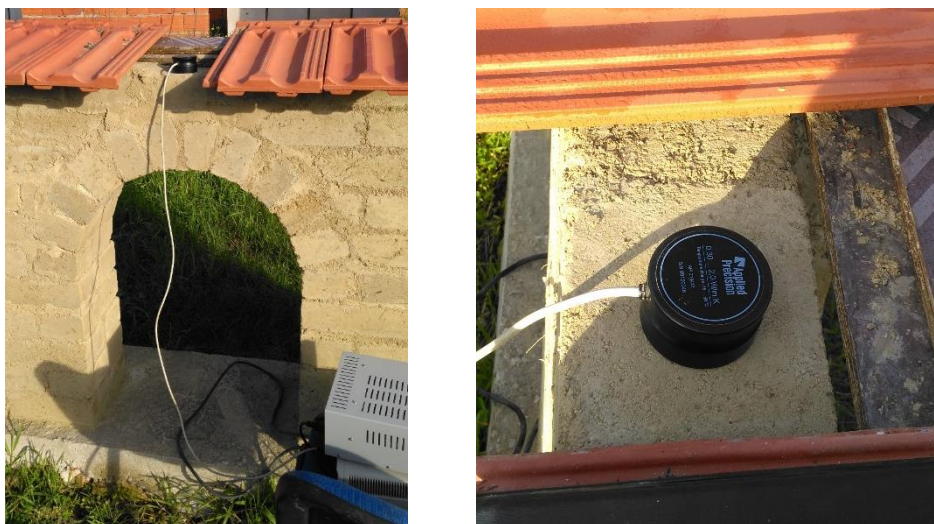


Figura 5.17 - Ensaio de condutibilidade térmica (à esq.); Sonda API 210412 colocada no topo do murete 2 (à dir.)

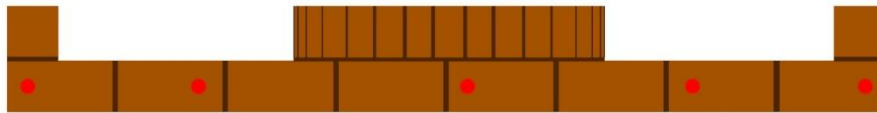


Figura 5.18 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde o ensaio foi realizado no topo dos muretes

Apresentação e análise de resultados

As condutibilidades térmicas de cada murete, antes e após um período de precipitação, resultam da média aritmética dos cinco valores obtidos no topo dos muretes e constam na Figura 5.19.

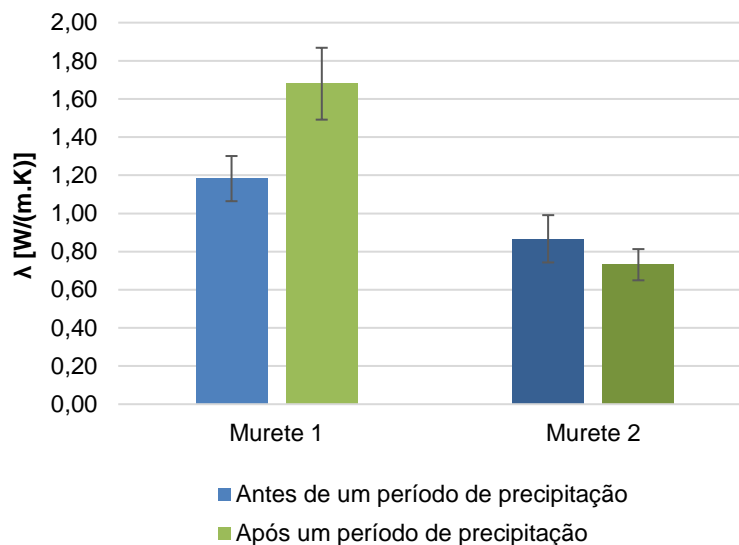


Figura 5.19 - Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica

Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que o murete 1 apresenta valores de condutibilidade térmica superiores. Tendo em conta que o topo do murete 1 não se encontra protegido por telhas cerâmicas, a maior condutibilidade térmica verificada pode ser explicada pela ação da humidade do ar, que precipita por condensação na forma de gotas devido à diminuição da temperatura durante a noite, levar a um aumento do teor de água dos BTC que constituem o topo do murete 1.

Após um período de precipitação a condutibilidade térmica do murete 1 aumentou devido à ação direta da água sobre o topo. No entanto, no caso do murete 2 a condutibilidade diminuiu, indicando que a água não entrou em contacto com os blocos protegidos pelas telhas cerâmicas.

A HR do ar foi analisada antes e após um período de chuva, sendo superior na primeira situação. Para o murete 2, a maior HR verificada aliada ao elevado potencial higroscópico dos BTC, traduziu-se numa condutibilidade térmica superior antes da ocorrência de um período de precipitação, devido ao maior teor em água dos blocos. No caso do murete 1, como o topo se encontra exposto à ação direta da água, a influência da HR é menos significativa.

5.4.2 Ensaio de choque de esfera

Descrição do ensaio

Para a realização do ensaio de choque de esfera utilizou-se o aparelho *Martinet-Baronnie*. O ensaio permite avaliar a deformabilidade superficial dos blocos, através da resistência ao impacto de uma esfera de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 0,5 kg de massa.

A avaliação deste parâmetro teve por base a ficha de ensaio FE Pa 25 (LNEC, 1980) e, como referido em 4.5, foi realizada em duas cotas diferentes (junto à base de betão em contacto com o solo e a meia altura dos muretes), na face Norte e Sul (Figura 5.20), antes e após um período de precipitação, de modo a ter em conta a influência da humidade ascensional, a orientação solar e a ação da chuva.

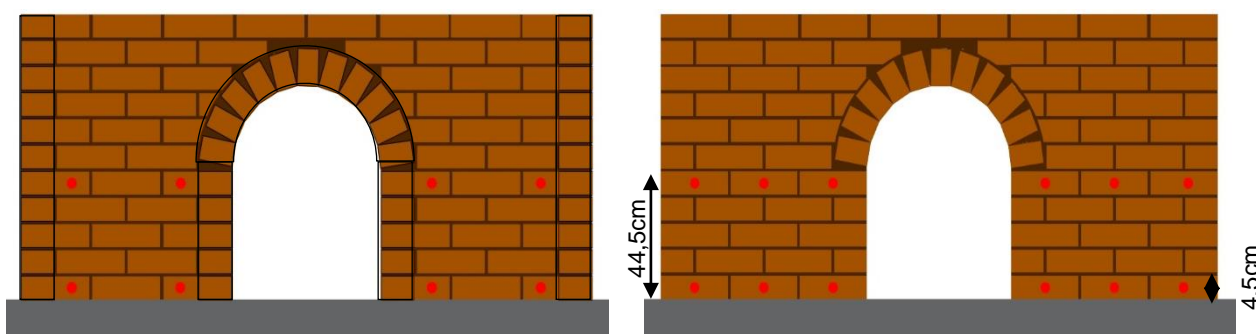


Figura 5.20 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde foi realizado o ensaio na face Norte (à esq.) e face Sul (à dir.) - alçados

Após se identificarem os pontos a ensaiar, colocou-se o braço do aparelho ao longo do corpo do *Martinet-Baronnie* (Figura 5.21 - à esquerda), encostando a esfera ao rolo existente no pé. Verificou-se a horizontalidade do aparelho a fim de que a trajetória descrita pelo braço ao tombar se fizesse no plano vertical e deixou-se, por fim, tombar livremente o braço a fim que se produzisse o impacto da esfera no murete duma só vez (Figura 5.21 - ao centro), ou seja, sem que ocorressem outros impactos. No final de cada ensaio, mediu-se o diâmetro da mocha provocada pela esfera na superfície (Figura 5.21 - à direita), com o auxílio de uma craveira digital.

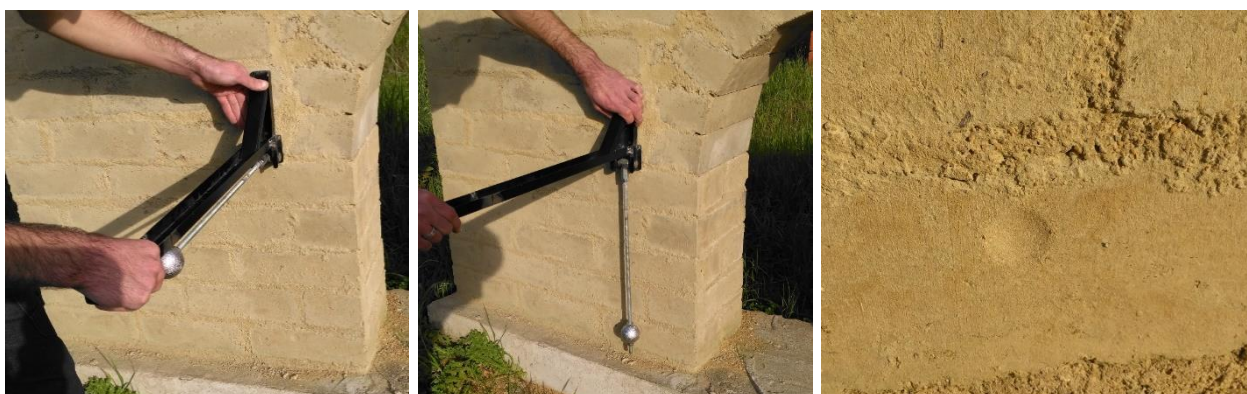


Figura 5.21 - Aparelho de *Martinet-Baronnie* (à esq.); Impacto da esfera no murete (ao cent.); Mocha provocada pela esfera na superfície do bloco (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 5.22 (face Norte) e Figura 5.23 (face Sul) apresentam-se os resultados do ensaio, expressos em mm, para cada cota do murete 1 e 2, antes e após um período de precipitação.

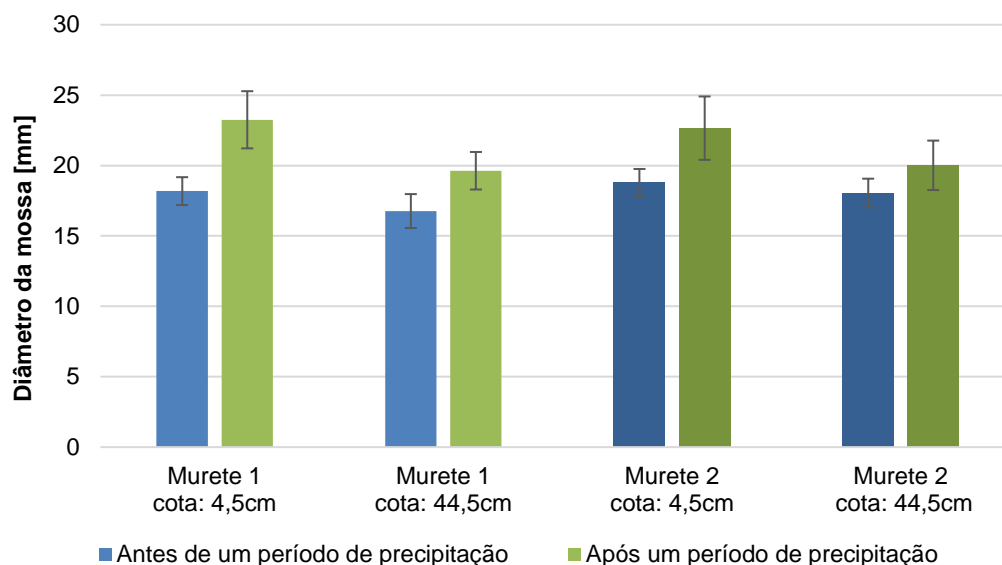


Figura 5.22 - Resultados obtidos no ensaio de choque de esfera na face Norte de cada murete

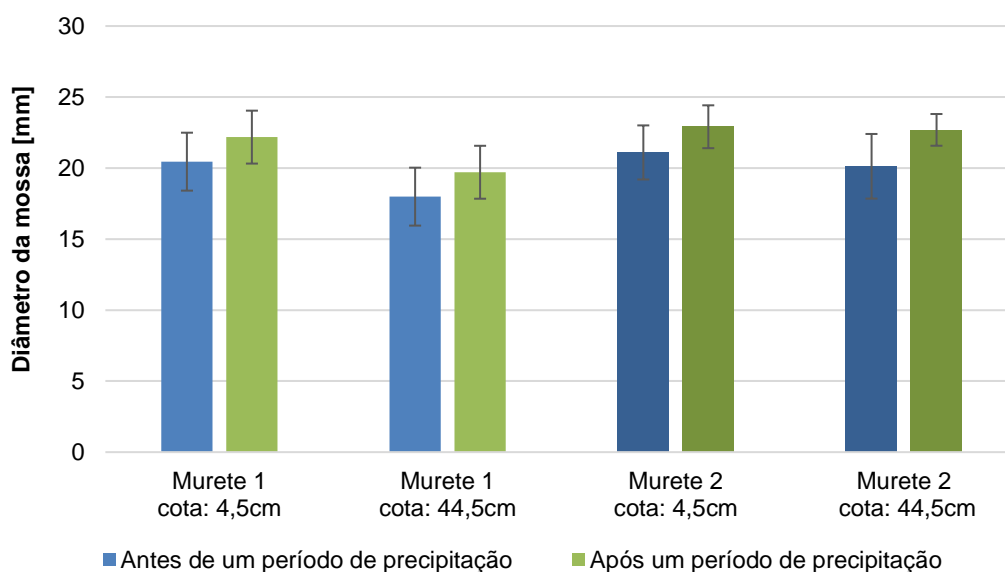


Figura 5.23 - Resultados obtidos no ensaio de choque de esfera na face Sul de cada murete

Da análise das Figuras 5.22 e 5.23 verifica-se que os dois muretes apresentam resultados bastante aproximados. Tendo em conta o comportamento semelhante dos dois muretes, na Figura 5.24 apresentam-se os valores médios e respetivos desvios padrão de cada cota, obtidos através da média aritmética dos resultados de ambos os muretes. Além disso, no Quadro 5.1 apresentam-se os valores médios de ambas as faces e o valor médio global, que resultam da média aritmética dos resultados obtidos para as diferentes cotas avaliadas em ambas as faces dos dois muretes.

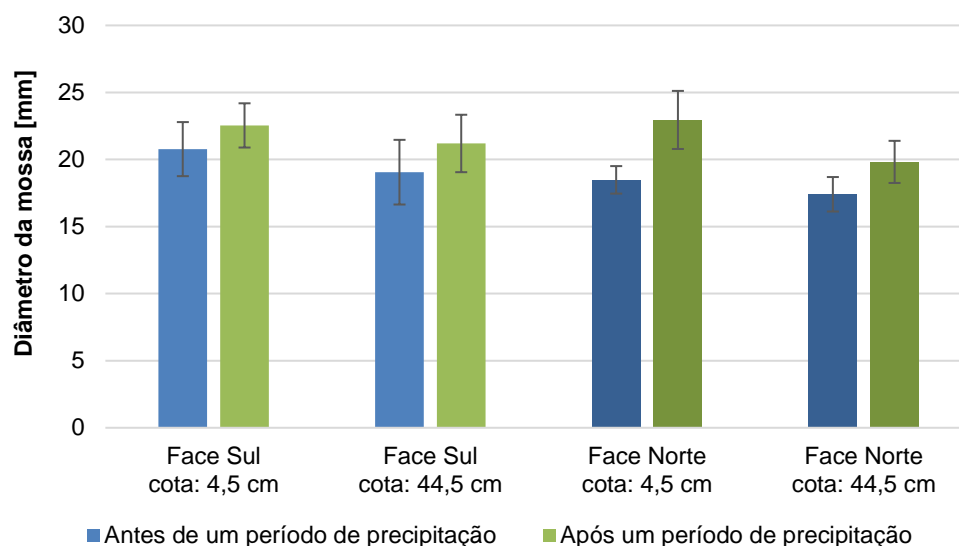


Figura 5.24 - Valores médios de cada cota obtidos através do ensaio de choque de esfera em ambas as faces dos muretes

Quadro 5.1 - Valores médios de ambas as faces e valores globais obtidos através do ensaio de choque de esfera

	Antes de um período de precipitação	Após um período de precipitação
Valor médio da face Norte [mm]	18±1	21±2
Valor médio da face Sul [mm]	20±2	22±2
Valor médio global [mm]	19±2	22±2

Numa primeira análise, poderia afirmar-se que quanto menor o diâmetro da mocha, maior a resistência superficial do bloco; no entanto, deve ter-se em consideração que um diâmetro relativamente elevado pode significar um bom resultado, desde que não seja acompanhado de fissuração, uma vez que indica uma elevada deformabilidade.

Analisando os resultados verifica-se que o diâmetro da mocha, provocada pelo impacto da esfera, aumentou após o período de precipitação tanto na face Norte como na face Sul, indicando assim que o maior teor de água dos blocos, devido à ação da chuva, se traduziu numa maior deformabilidade, já que não se observou qualquer tipo de fissuração.

Quando se observa a orientação solar dos muretes constata-se que na face orientada a Sul, os resultados antes e após o período de chuva, são mais aproximados do que os obtidos na face Norte. Este facto pode ser explicado pela ação direta do sol provocar uma secagem mais rápida e eficaz da face Sul, levando a que rapidamente se alcancem as condições existentes antes de ocorrer precipitação.

Importa ainda salientar que em ambas as faces os resultados foram ligeiramente superiores para a cota de 4,5 cm, sendo assim possível presumir que a água presente no solo migrou por capilaridade através da base de betão até ao murete, progredindo até um nível em que se verifica o equilíbrio entre

evaporação e capilaridade, resultando num maior teor de água dos BTC da base e, consequentemente, uma maior deformabilidade.

5.4.3 Resistência superficial por esclerómetro pendular

Descrição do ensaio

O ensaio teve por base a norma ASTM C805 (ASTM, 2008) e permite avaliar a resistência e a dureza superficial de um material, com recurso a um esclerómetro pendular (modelo Schmidt PM). Com o equipamento encostado ao murete, o pêndulo de massa conhecida é libertado, registando um ressalto ao embater na superfície. Através da quantidade de energia recuperada pelo ressalto obtém-se um índice de dureza em cada ponto sobre uma escala graduada no aparelho. Quanto maior a dureza, maior será o ressalto.

A avaliação deste parâmetro foi realizada em três cotas diferentes (junto à base de betão em contacto com o solo, a meia altura dos muretes e mais junto ao topo), na face Norte e Sul (Figura 5.25), antes e após um período de precipitação, de modo a ter em conta a influência da humidade ascensional, a orientação solar e a ação da chuva.

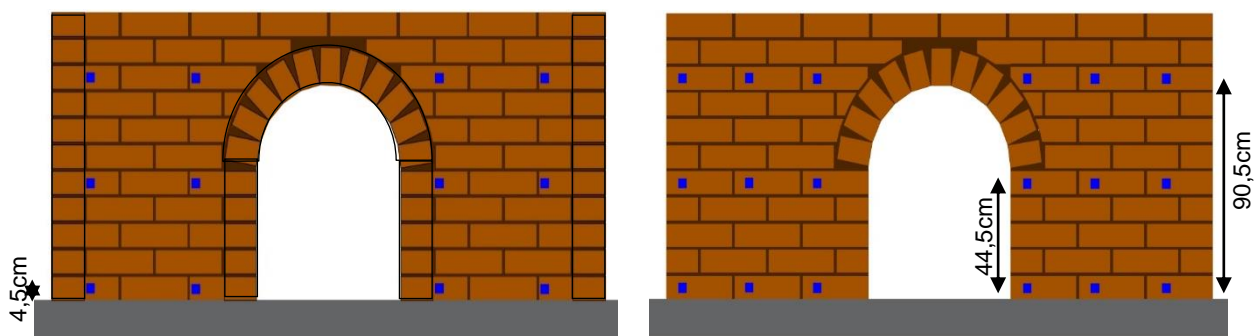


Figura 5.25 - Representação esquemática dos pontos (a azul) onde foi realizado o ensaio na face Norte (à esq.) e face Sul (à dir.) - alçados

Após identificação dos pontos a ensaiar, colocou-se o equipamento (Figura 5.26 - à esquerda) encostado ao murete em cada ponto selecionado, e de seguida libertou-se o pêndulo, através do botão de disparo (Figura 5.26 - à direita), tendo em atenção que o esclerómetro tem sempre de estar bem encostado à superfície de ensaio. Registaram-se as leituras dadas pelo esclerómetro em cada ponto.



Figura 5.26 - Esclerómetro pendular - modelo Schmidt PM (à esq.); Pêndulo libertado através do botão de disparo (à dir.)

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 5.27 (face Norte) e Figura 5.28 (face Sul) apresentam-se os valores obtidos para a resistência superficial, expressos em graus Vickers, para cada cota do murete 1 e 2, antes e após um período de precipitação.

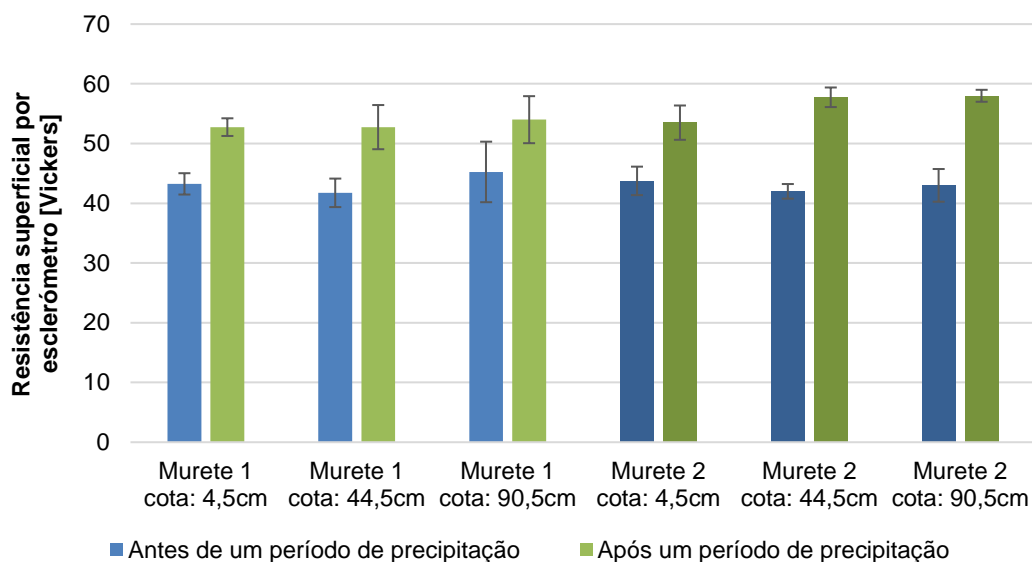


Figura 5.27 - Resultados obtidos para a resistência superficial por esclerômetro pendular na face Norte

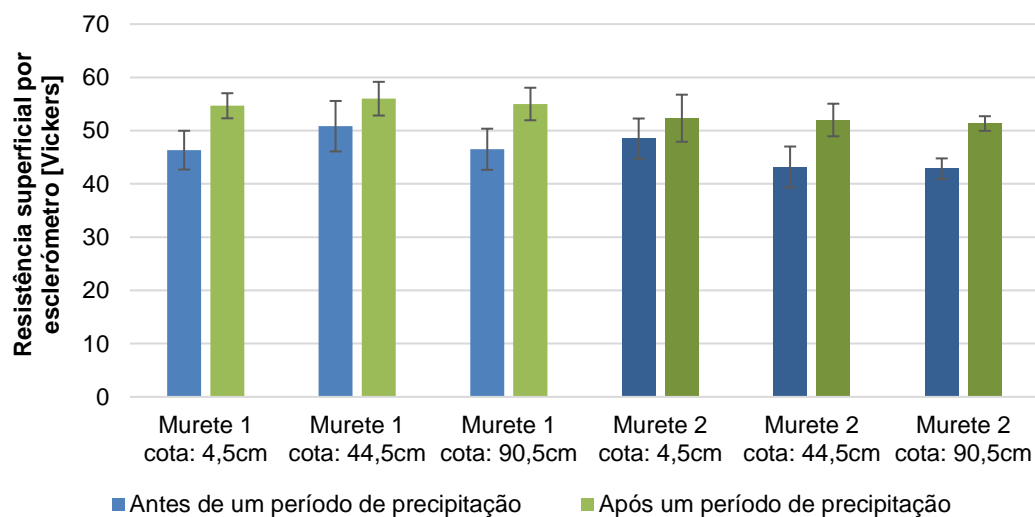


Figura 5.28 - Resultados obtidos para a resistência superficial por esclerômetro pendular na face Sul

Da análise das Figuras 5.27 e 5.28 constata-se que os dois muretes apresentam resistências superficiais bastante semelhantes. Tendo em conta o comportamento semelhante dos dois muretes, na Figura 5.29 apresentam-se os valores médios e respectivos desvios padrão da resistência superficial de cada cota,

obtidos através da média aritmética dos resultados de ambos os muretes. No Quadro 5.2 apresentam-se os valores médios de ambas as faces e valor médio global, antes e após um período de precipitação.

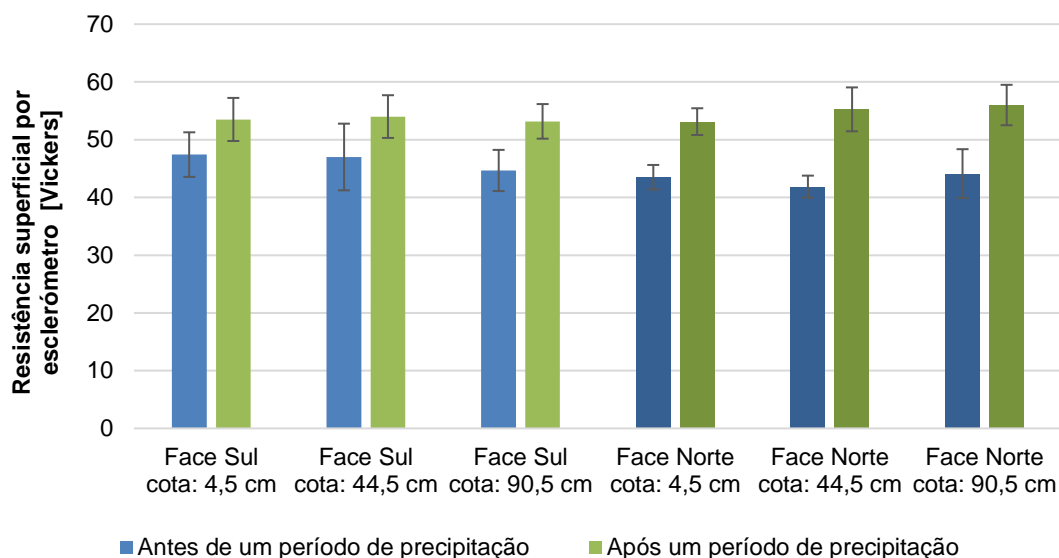


Figura 5.29 - Valores médios de resistência superficial para cada cota em ambas as faces dos muretes

Quadro 5.2 - Valores médios de resistência superficial de ambas as faces e valores médios globais

	Antes de um período de precipitação	Após um período de precipitação
Valor médio da face Norte [Vickers]	43±3	55±3
Valor médio da face Sul [Vickers]	46±5	54±4
Valor médio global [Vickers]	45±4	54±4

Analisando os resultados, constata-se que após um período de chuva a resistência superficial dos blocos de terra aumentou em ambas as faces dos muretes, possivelmente pelo facto de uma maior quantidade de água à superfície promover uma maior coesão e interação entre as partículas que constituem os BTC. Na realidade, uma parede em alvenaria de BTC nunca se encontra completamente seca, uma vez que existe uma quantidade de água que não evapora por se encontrar em equilíbrio com a humidade relativa do ar envolvente. Além disso, o facto do processo de cura dos BTC ter decorrido num ambiente não controlado (ambiente exterior) e se terem verificado temperaturas elevadas durante a fase inicial do processo, pode ter promovido a formação de camadas superficiais mais resistentes por melhor hidratação do cimento, e eventual deficiência de hidratação mais em profundidade nos BTC produzidos.

Os resultados obtidos para a resistência superficial dos muretes comprovam o referido em 5.4.2, ou seja, o aumento do diâmetro da moesa não significa necessariamente uma redução da resistência superficial, mas sim o aumento da deformabilidade desde que não se observe qualquer tipo de fissuração.

Quando se comparam os resultados em ambas as faces dos muretes constata-se que os valores na face orientada a Sul, antes e após o período de chuva, são mais aproximados do que os obtidos na face

Norte. Tal como mencionado em 5.4.2 também neste caso a ação direta do sol na face Sul promove uma secagem mais rápida e eficaz, levando a que rapidamente se alcancem as condições existentes antes de ocorrer precipitação.

Aquando da realização do ensaio verificou-se ainda que se obtiveram resistências superiores junto aos cunhais e aros das aberturas, onde a rigidez dos muretes é superior por nesses pontos os BTC se encontrarem perpendiculares à face dos muretes.

5.4.4 Velocidade de propagação de ultrassons

Descrição do ensaio

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado com base na ficha de ensaio FE Pa 43 (LNEC, 2010), recorrendo a um aparelho Pundit Lab da marca Proceq (Figura 5.30 - à esquerda) com dois transdutores de 54 kHz, que permite avaliar a compacidade e rigidez dos BTC e argamassa de assentamento.

A avaliação desta característica consiste na emissão de um impulso, por parte de um transdutor eletroacústico (emissor) colocado sobre a superfície a ensaiar, que percorre uma distância pré-definida até um segundo transdutor (recetor), sendo registado pelo aparelho o tempo em microssegundos que a onda necessita para percorrer essa distância. A existência de anomalias como é o caso de fendilhação, má homogeneização e pouca compacidade, pode ser detetada através deste ensaio, resultando numa menor velocidade de propagação das ondas.

A medição da velocidade de propagação do impulso foi realizada através do método direto (transdutores colocados em faces opostas do murete) e método indireto (transdutores posicionados na mesma face de ensaio), em três cotas diferentes.

Após serem marcados os pontos a ensaiar nas faces orientadas a Sul, os transdutores foram posicionados nos muretes e deu-se início ao ensaio (Figura 5.30 - à direita), sendo registado pelo aparelho o tempo decorrido entre a emissão e receção do impulso.



Figura 5.30 - Aparelho Pundit Lab da marca Proceq (à esq.); Posicionamento dos transdutores eletroacústicos (à dir.)

Para cada cota foram realizadas quatro medições, através do método indireto, com uma distância entre os transdutores de 15 cm e três com uma distância de 30 cm (Figura 5.31). No que diz respeito ao método direto, foi realizada uma medição para cada cota com uma distância de 14 cm (Figura 5.32).

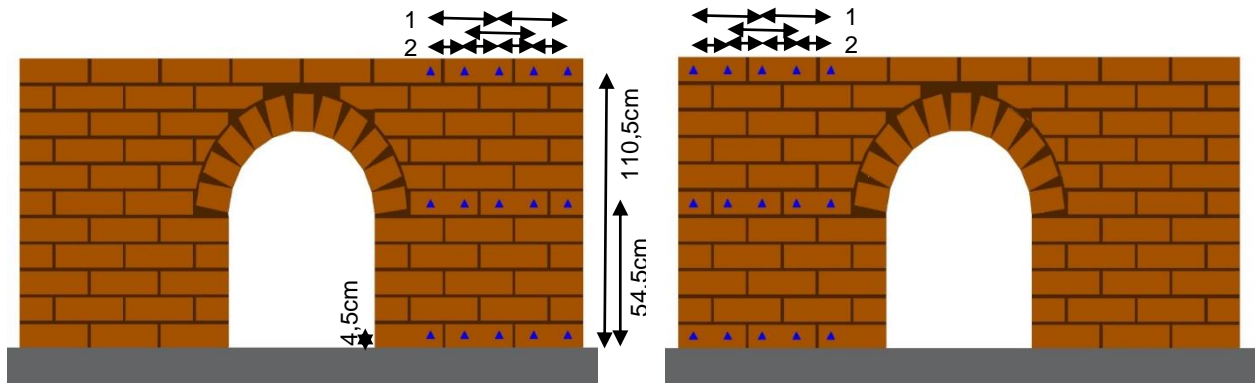


Figura 5.31 - Representação esquemática dos pontos (a azul) onde foi realizado o ensaio através do método indireto no murete 1 (à esq.) e murete 2 (à dir.) com distâncias pré-definidas (1 - 15cm; 2 - 30cm) - alçados



Figura 5.32 - Representação esquemática de um ponto onde foi realizado o ensaio através do método direto no murete 1 (a vermelho) e murete 2 (a azul) - corte horizontal

Apresentação e análise de resultados

A velocidade de propagação de ultrassons V_{us} , expressa em m/s, resulta do quociente entre a distância pré-definida para colocação dos transdutores e o tempo que a onda longitudinal demora a percorrer essa distância. Os valores médios obtidos para cada cota e respectivos desvios padrão, antes e após um período de precipitação, são apresentados na Figura 5.33 e na Figura 5.34.

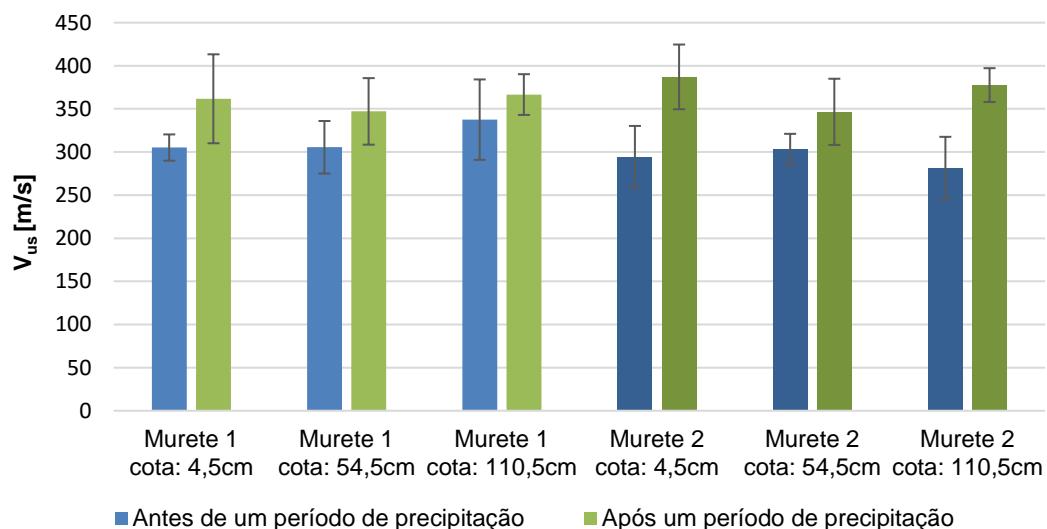


Figura 5.33 - Resultados obtidos para a velocidade de propagação de ultrassons através do método indireto em ambos os muretes

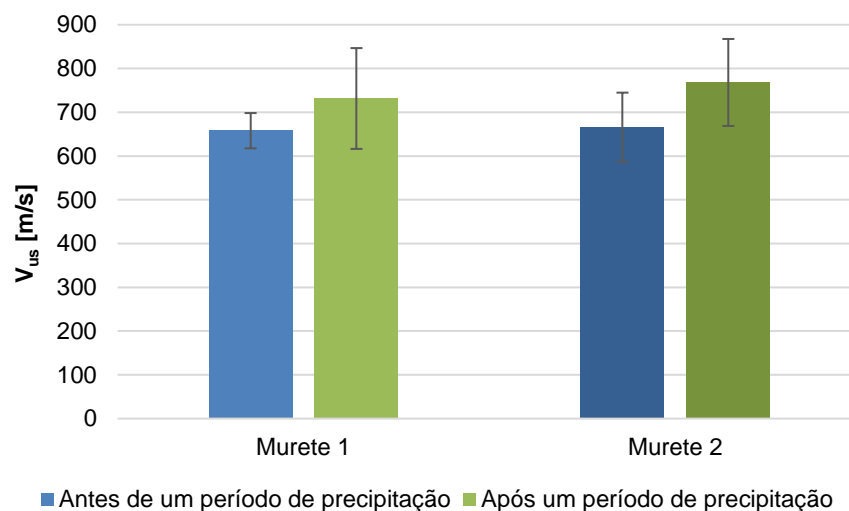


Figura 5.34 - Resultados obtidos para a velocidade de propagação de ultrassons através do método direto em ambos os muretes

Analizando os resultados apresentados na Figura 5.33 e na Figura 5.34 verifica-se que os dois muretes apresentam um comportamento bastante semelhante. Tendo isso em conta, na Figura 5.35 apresentam-se os valores médios e respectivos desvios padrão da velocidade de propagação de ultrassons de cada cota, obtidos através da média aritmética dos resultados do ensaio realizado pelo método indireto em ambos os muretes. O valor médio da face Sul corresponde à média aritmética dos resultados verificados em ambos os muretes através do método indireto, tendo-se obtido velocidades de $304,50 \pm 36,46$ m/s e $364,44 \pm 39,35$ m/s antes e após um período de precipitação, respetivamente.

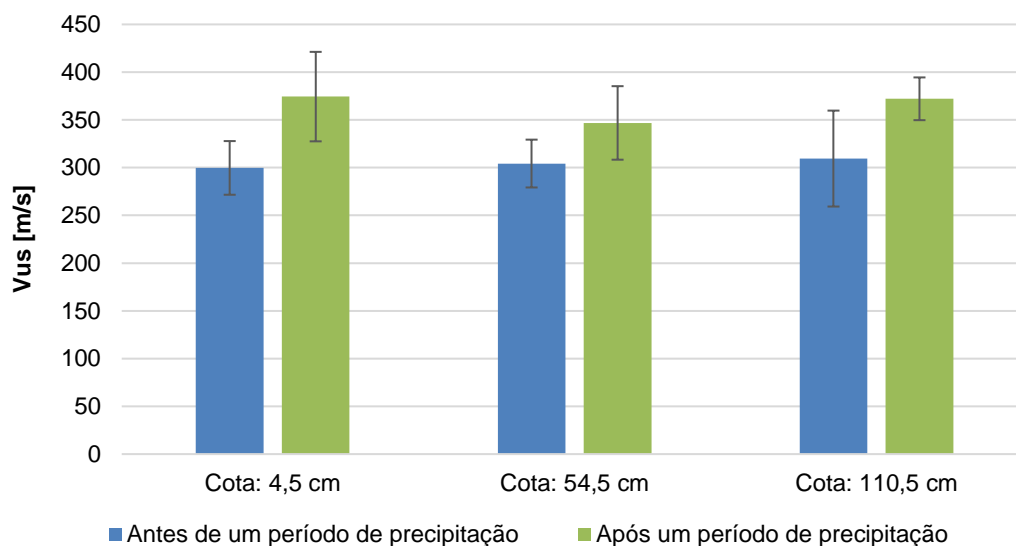


Figura 5.35 - Valores médios de velocidade de propagação de ultrassons para cada cota dos muretes

Ao analisar a Figura 5.35 verifica-se que, antes da ocorrência de um período de precipitação, a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas obtida foi bastante semelhante independentemente da cota dos muretes avaliada. No entanto, após um período de precipitação a velocidade de propagação

aumentou para as três cotas avaliadas, sendo esse aumento mais significativo junto à base e no topo dos muretes por os BTC se encontrarem mais expostos à ação da água. A maior velocidade verificada pode em parte ser justificada pelo facto de, após o período de chuva, os vazios que até então se encontravam preenchidos por ar, passarem a conter água. Como os ultrassons se propagam a uma velocidade superior na água, a humidade presente que propicia o preenchimento dos vazios levou a um aumento da velocidade de propagação.

Além da ação direta sobre os BTC, a chuva que atingiu a área envolvente aos muretes levou a um aumento da quantidade de água no solo, que por capilaridade migrou através da base de betão até aos muretes, resultando num maior teor de água dos BTC da base e, conseqüentemente, numa maior velocidade de propagação dos impulsos ultrassónicos.

De salientar também que a elevada dispersão de resultados pode em parte ser justificada pela pouca homogeneidade dos blocos de terra que constituem os muretes avaliados, uma vez que estes foram executados por uma equipa de estudantes com muito pouca especialização e experiência.

5.4.5 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

Descrição do ensaio

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten, realizado com base na ficha de ensaio FE Pa 39 (LNEC, 2002) e norma EN 16302 (CEN, 2013), permite avaliar a capacidade de um material absorver água a baixa pressão numa determinada área e durante um certo período de tempo.

Começou-se por determinar os diâmetros interiores dos tubos de Karsten indicados para fixação em superfícies verticais. Posteriormente, definiram-se os pontos em que se iria realizar o ensaio em cada murete e de seguida fixaram-se três tubos, em três cotas diferentes da face orientada a Sul (Figura 5.36), com o auxílio de anéis de plasticina aplicados em redor da abertura de modo a garantir a estanquidade do sistema (Figura 5.37). Pressionou-se cada um dos tubos contra o murete, tendo o cuidado de não obstruir a área de contacto da água com o bloco.

Encheram-se os tubos com desfasamento de um minuto até à marca de 0 ml, o que equivale a conter 4 ml de água, e começou-se a contabilizar o tempo. Registou-se a quantidade de água absorvida em intervalos de um minuto até perfazer 4 ml, sendo que nos tubos em que a absorção ocorreu muito lentamente, registou-se a água absorvida até se obter uma quantidade significativa de valores.

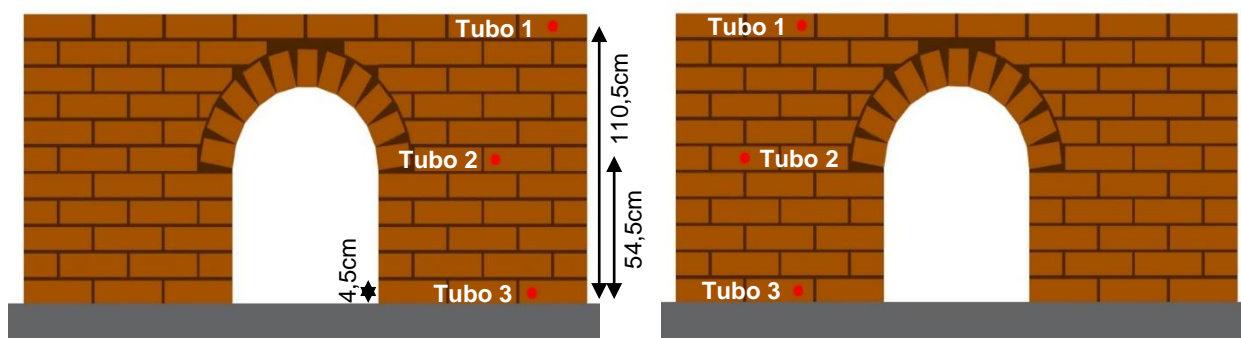


Figura 5.36 - Representação esquemática dos pontos (a vermelho) onde foi realizado o ensaio de absorção de água sob baixa pressão no murete 1 (à esq.) e murete 2 (à dir.) - alçados



Figura 5.37 - Fixação de tubo de Karsten ao murete com anel de plasticina de modo a garantir estanquidade do sistema

A quantidade de água absorvida por unidade de área, expressa em ml/cm², é determinada através da equação 5.3.

$$W_f = \frac{Q_f}{A} \quad (5.3)$$

Nesta equação, W_f - quantidade de água absorvida por unidade de área [ml/cm²]; Q_f - água absorvida [ml]; A - área de contacto com o bloco [cm²].

Foi também determinado o coeficiente de absorção de água através da equação 5.4 de Barnes (s.d.), que traduz a quantidade de água absorvida numa determinada área durante um determinado período de tempo.

$$C_{ab} = \frac{w_m \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \sqrt{t} \right)} \quad (5.4)$$

Nesta equação, C_{ab} - coeficiente de absorção de água [kg/(m².t^{0.5})]; w_m - água absorvida [ml]; d - diâmetro do tubo [mm]; t - tempo leitura [minutos].

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 5.38 apresentam-se os valores médios da quantidade de água absorvida em cada cota, após 4 minutos de ensaio realizado antes e após um período de precipitação, obtidos através da média dos dois valores correspondentes aos dois tubos fixados na mesma cota, um em cada murete. Além disso, no Quadro 5.3 apresentam-se os valores médios e respetivos desvios padrão do coeficiente de absorção e da quantidade de água absorvida pelos dois muretes na face Sul, após 4 minutos de ensaio realizado antes e após um período de precipitação, obtidos através da média aritmética dos resultados correspondentes aos seis tubos utilizados no ensaio (três em cada murete).

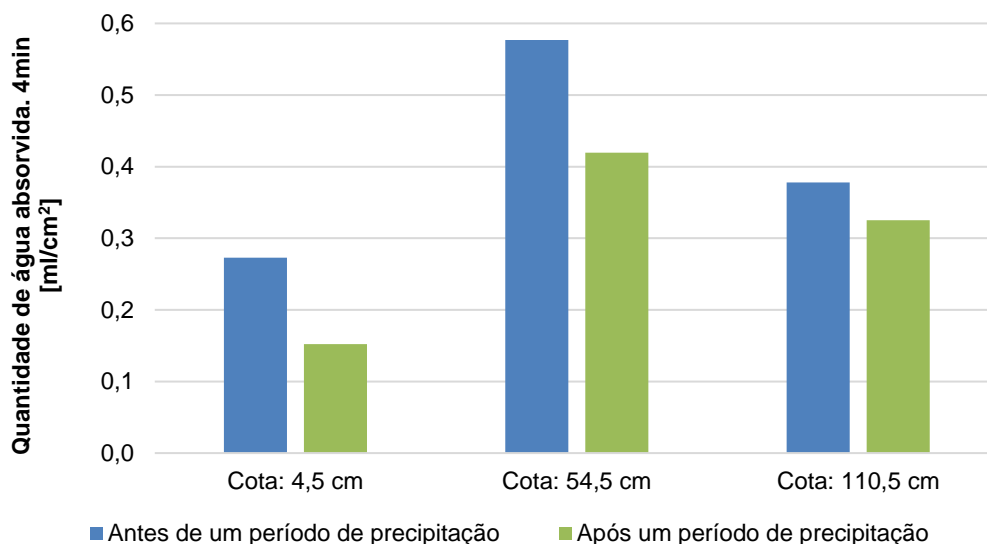


Figura 5.38 - Quantidade de água absorvida sob baixa pressão por tubos de Karsten ao fim de 4 minutos nos blocos dos muretes (face Sul)

Quadro 5.3 - Valor médio do coeficiente de absorção e da quantidade de água absorvida sob baixa pressão por tubos de Karsten ao fim de 4 minutos nos blocos dos muretes (face Sul)

	Antes de um período de precipitação	Após um período de precipitação
Coeficiente de absorção médio [kg/(m².t^{0,5})]	2,1±1,0	1,5±0,7
Valor médio da face Sul [ml/cm²]	0,4±0,2	0,3±0,1

Analisando os resultados obtidos após um período de precipitação verifica-se que a quantidade de água absorvida diminuiu nas três cotas avaliadas. O facto de, após o período de chuva, grande parte dos vazios que até então se encontravam preenchidos por ar passarem a conter água pode em parte justificar a menor quantidade de água absorvida.

Além da ação direta sobre os BTC, a chuva que atingiu a área envolvente aos muretes levou a um aumento da quantidade de água no solo, que por capilaridade migrou através da base de betão até aos muretes, resultando num maior teor de água dos BTC da base e, consequentemente, numa menor quantidade de água absorvida. O facto da humidade presente no solo migrar por capilaridade preenchendo parte dos vazios pode também justificar a menor quantidade de água absorvida pelos BTC da base antes da ocorrência de um período de chuva.

Tal como mencionado em 5.4.4, a elevada dispersão de resultados visível através dos desvios padrão obtidos pode em parte ser justificada pela pouca homogeneidade dos blocos de terra que constituem os muretes avaliados.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1 Argamassa de assentamento de terra estabilizada

No Quadro 6.1 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização da argamassa de terra estabilizada no estado fresco.

Quadro 6.1 - Resultados obtidos na caracterização da argamassa de assentamento no estado fresco

Consistência por espalhamento [mm]	157,5±2,8
Consistência por penetrômetro [cm]	1,3±0,05
Massa volúmica [kg/dm³]	1,99
Teor de ar [%]	3,2

Como referido em 2.1.3, a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) estabelece que a argamassa no estado fresco deve apresentar uma consistência por espalhamento de 175±5 mm e uma massa volúmica superior a 1,2 kg/dm³. Embora a norma DIN (NABau, 2013a) seja apenas relativa a argamassas de terra não estabilizadas, ao analisar o Quadro 6.1 constata-se que a argamassa de terra estabilizada ensaiada cumpre o exigido pela norma (NABau, 2013a) no que diz respeito à massa volúmica. No entanto, a argamassa foi formulada com trabalhabilidade considerada adequada à aplicação, tendo sido esse o requisito considerado.

No que diz respeito à retração linear, verificou-se aquando da desmoldagem dos provetes prismáticos que a retração existente era ínfima estando por isso de acordo com a norma DIN 18946 (NABau, 2013a). Esta retração tão pouco significativa pode resultar do traço da argamassa e da estabilização com cimento, bem como do baixo teor de água e do tipo e teor reduzido da argila da terra.

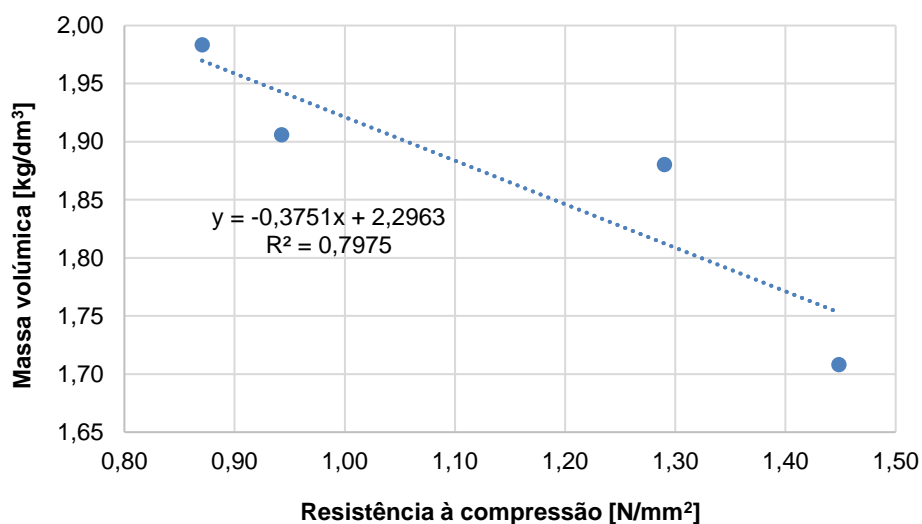
No Quadro 6.2 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização da argamassa no estado endurecido, através dos ensaios de massa volúmica aparente, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão, resistência à compressão e condutibilidade térmica.

Com o aumento do tempo de cura a água presente na argamassa tende a evaporar-se, sendo apenas consumida a necessária para as reações de hidratação do cimento, adicionado com o objetivo de estabilizar quimicamente a terra e levando a um aumento das resistências mecânicas da argamassa.

Ao analisar a Figura 6.1, que relaciona os resultados obtidos para a massa volúmica e resistência à compressão da argamassa de terra estabilizada, é possível verificar que a diminuição da massa volúmica devido à evaporação da água durante o processo de cura, aliada à hidratação do cimento adicionado como agente estabilizador, traduz-se num aumento da rigidez e, consequentemente, da resistência à compressão.

Quadro 6.2 - Resultados obtidos na caracterização da argamassa de assentamento no estado endurecido

Ensaio	7 dias		28 dias	
	Cura húmida	Cura <i>standard</i>	Cura húmida	Cura <i>standard</i>
Massa volúmica [kg/dm ³]	1,98±0,00	1,91±0,02	1,88±0,03	1,71±0,01
Módulo de elasticidade dinâmico [N/mm ²]	-	2354±155	-	2048±81
Resistência à tração por flexão [N/mm ²]	0,64±0,03	0,54±0,02	0,78±0,05	0,61±0,04
Resistência à compressão [N/mm ²]	0,87±0,04	0,94±0,03	1,29±0,02	1,45±0,05
Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	-	-	0,98±0,04	0,69±0,02

**Figura 6.1** - Relação entre massa volúmica e resistência à compressão da argamassa de assentamento

Quanto à resistência à tração por flexão, os resultados são significativamente influenciados pelo teor em água da argamassa. A diminuição da massa volúmica, resultante da evaporação da água, implica uma redução da deformabilidade e, conseqüentemente, da resistência, sendo esta redução mais significativa em condições *standard* de temperatura e HR devido ao elevado potencial higroscópico deste tipo de material.

Aos 28 dias as resistências à tração por flexão são superiores, verificando-se como anteriormente que uma maior massa volúmica, resultante de um maior teor em água, se traduz numa resistência superior devido à maior deformabilidade da argamassa estudada.

Segundo a DIN 18946 (NABau, 2013a), a massa volúmica aparente e resistência à compressão da argamassa de assentamento de terra devem ser avaliadas e classificadas em condições *standard* de temperatura e humidade relativa. Tendo isso em conta, a argamassa em estudo sujeita a cura *standard*

pode ser classificada, quanto à massa volúmica aparente, como pertencente à classe 1,8, uma vez que apresenta valores entre 1,61 e 1,80 kg/dm³.

No que diz respeito à resistência à compressão, segundo a norma DIN (NABau, 2013a) a argamassa de terra estabilizada pertence à classe M0, uma vez que apresenta uma resistência inferior a 2 N/mm². Já de acordo com a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) pode ser classificada como uma argamassa de classe M1 uma vez que apresenta uma resistência superior a 1 N/mm² e inferior a 2,5 N/mm².

6.2 Blocos de terra comprimida

No Quadro 6.3 é possível observar os resultados obtidos na caracterização de um tipo de BTC, através dos ensaios de massa volúmica aparente e resistência à compressão.

Quadro 6.3 - Resultados dos ensaios de massa volúmica e resistência à compressão dos BTC

	Elevada HR	Standard
Massa volúmica DIN 18945 e UNE 41410 [kg/dm³]	1,80±0,06	1,81±0,06
Resistência à compressão DIN 18945 e UNE 41410 [N/mm²]	0,88±0,10	1,38±0,24
Resistência à compressão NTC 5324 [N/mm²]	-	0,62±0,10
Resistência à compressão Bloco vertical [N/mm²]	0,51±0,14	0,46±0,10
Resistência à compressão Argamassa c/ mesma comp. do BTC [N/mm²]	-	0,48±0,03
Resistência à compressão Provetes de alvenaria [N/mm²]	-	0,52±0,10

De acordo com a DIN 18945 (NABau, 2013b) (e embora, como já referido, esta norma seja para blocos não estabilizados) a massa volúmica aparente dos blocos deve ser avaliada e classificada em condições *standard* de temperatura e humidade relativa. Tendo em conta os resultados obtidos para a massa volúmica, os BTC podem ser classificados como pertencentes à classe 1,8, uma vez que apresentam valores entre 1,61 e 1,80 ± 0,1 kg/dm³.

Segundo as normas UNE 41410 (AENOR, 2008) e DIN 18945 (NABau, 2013b), a resistência à compressão deve ser avaliada em condições *standard* de temperatura e humidade relativa. Tendo isso em conta, os blocos em condições *standard* podem ser classificados de acordo com a norma UNE 41410 (AENOR, 2008) como pertencentes à classe BTC 1 uma vez que apresentam uma resistência de aproximadamente 1,3 N/mm². A norma DIN (NABau, 2013b) define que os BTC utilizados em paredes resistentes devem apresentar uma resistência mínima de 2 N/mm², não sendo assim possível classificar os blocos em estudo de acordo com esta norma. No entanto, segundo a norma alemã (NABau, 2013b), os blocos utilizados em paredes não resistentes devem apresentar uma resistência de pelo menos 1 N/mm², podendo assim concluir-se que os blocos em estudo são adequados para esse tipo de aplicação.

A norma NTC 5324 (ICONTEC, 2004) estabelece que os blocos de terra comprimida, quando avaliados em condições *standard* de temperatura e humidade relativa, devem apresentar uma resistência à compressão média mínima de 2 N/mm², com nenhum valor individual inferior a 1,2 N/mm². Analisando o Quadro 6.3 verifica-se que os valores obtidos são inferiores aos definidos na norma colombiana (ICONTEC, 2004), não permitindo assim a classificação dos BTC estudados segundo classes de resistência à compressão.

6.3 Alvenarias de blocos de terra comprimida

No Quadro 6.4 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização *in situ* dos dois muretes de alvenaria realizada com os BTC caracterizados, assentes com argamassa com a mesma composição dos blocos.

Quadro 6.4 - Resultados obtidos na caracterização *in situ* dos dois muretes

			Antes de um período de precipitação		Após um período de precipitação		
				Média		Média	
λ [W/m.K]	Topo	Murete 1	1,18±0,12	1,01±0,20	1,68±0,19	1,21±0,50	
		Murete 2	0,87±0,12		0,73±0,08		
Ensaio de choque de esfera [mm]	Norte	Murete 1: cota 4,5 cm	18±1	18±1	18±1	23±2	23±2
		Murete 2: cota 4,5 cm	19±1			23±2	
		Murete 1: cota 44,5 cm	17±1	20±1		20±2	21±2
		Murete 2: cota 44,5 cm	18±1	20±2			
	Sul	Murete 1: cota 4,5 cm	20±2	21±2	20±2	22±2	23±2
		Murete 2: cota 4,5 cm	21±2			23±2	
		Murete 1: cota 44,5 cm	18±2	20±2		21±2	22±2
		Murete 2: cota 44,5 cm	20±2	23±1			
Resistência superficial por esclerômetro [Vickers]	Norte	Murete 1: cota 4,5 cm	43±2	44±2	43±3	53±1	53±2
		Murete 2: cota 4,5 cm	44±2			54±3	
		Murete 1: cota 44,5 cm	42±2	42±2		53±4	55±4
		Murete 2: cota 44,5 cm	42±1			58±2	
		Murete 1: cota 90,5 cm	45±5	44±4		54±4	56±4
		Murete 2: cota 90,5 cm	43±3			58±1	
	Sul	Murete 1: cota 4,5 cm	46±4	47±4	55±2	54±4	
		Murete 2: cota 4,5 cm	49±4		52±4		

Quadro 6.4 - Resultados obtidos na caracterização *in situ* dos dois muretes (cont.)

		Antes de um período de precipitação		Após um período de precipitação	
			Média		Média
Resistência superficial por esclerómetro [Vickers]	Murete 1: cota 44,5 cm	51±5	47±6	56±3	54±4
	Murete 2: cota 44,5 cm	43±4	46±5	52±3	54±4
	Murete 1: cota 90,5 cm	47±4	45±4	55±3	53±3
	Murete 2: cota 90,5 cm	43±2		51±1	54±4
Velocidade de prop. de ultrassons (método indireto) [m/s]	Murete 1: cota 4,5 cm	305,13±15,25	299,72±28,12	361,70±51,58	374,39±46,85
	Murete 2: cota 4,5 cm	294,32±35,92	304,50±36,46	387,09±37,52	374,39±46,85
	Murete 1: cota 54,5 cm	305,47±30,48	304,28±25,05	347,07±38,60	346,82±38,49
	Murete 2: cota 54,5 cm	303,10±17,99	309,51±50,23	346,58±38,37	346,82±38,49
	Murete 1: cota 110,5 cm	337,52±46,62	304,50±36,46	366,62±23,61	372,12±22,37
	Murete 2: cota 110,5 cm	281,49±36,09	309,51±50,23	377,61±19,57	372,12±22,37
Velocidade de prop. de ultrassons (método direto) [m/s]	Murete 1	657,91±40,34	661,81±62,95	731,50±115,18	749,82±109,10
	Murete 2	665,70±79,17	661,81±62,95	768,14±99,35	749,82±109,10
Absorção de água sob baixa pressão [ml/cm²]	Cota 4,5 cm	0,3	0,4±0,2	0,2	0,3±0,1
	Cota 54,5 cm	0,6	0,4±0,2	0,4	0,3±0,1
	Cota 110,5 cm	0,4	0,4±0,2	0,3	0,3±0,1

Analisando o Quadro 6.4 verifica-se que as médias dos resultados obtidos nos dois muretes apresentam um desvio padrão relativamente baixo. Uma vez que as alvenarias respetivas foram realizadas por duas equipas distintas e em contexto de formação (sem grande experiência profissional), esse facto demonstra a viabilidade deste tipo de construção face a mão-de-obra não muito especializada. Verifica-se por outro

lado que os resultados obtidos através dos ensaios de choque de esfera, resistência superficial por esclerómetro pendular e velocidade de propagação de ultrassons são superiores após um período de precipitação.

Os maiores valores obtidos comprovam assim que a água que entra em contacto com as alvenarias de BTC através da humidade ascensional e ação da chuva tem uma influência significativa nas características deste tipo de material. Além disso, a nível interno, o preenchimento dos vazios por água traduziu-se num aumento da velocidade de propagação de ultrassons visto que, como referido anteriormente, a velocidade com que as ondas ultrassónicas se propagam na água é superior quando comparada com a velocidade de propagação no ar.

6.4 Comparação de resultados com outros autores

6.4.1 Argamassa de terra estabilizada

Embora cada terra utilizada tenha as suas características, optou-se por realizar uma comparação de resultados com os obtidos por outros autores. Um estudo realizado por Santos & Faria (2015) avaliou a consistência por espalhamento e massa volúmica no estado fresco de uma argamassa de terra não estabilizada pré-doseada para reboco interior, tendo obtido valores de $182,3 \pm 2,5$ mm para a consistência e $2,11$ kg/dm³ para a massa volúmica. Os resultados obtidos na presente dissertação são semelhantes aos do estudo realizado por Santos & Faria (2015). No entanto, a diferente composição e estabilização da argamassa de assentamento não permite uma comparação direta dos resultados.

Quanto à massa volúmica aparente, Santos & Faria (2015) obtiveram valores de $1,77 \pm 0,02$ kg/dm³ para a argamassa de terra pré-doseada. Num estudo realizado por Mansour et al. (2016) em BTC não estabilizados, o autor obteve valores de massa volúmica aparente entre $1,61$ e $2,19$ kg/dm³ para os blocos, sendo que os valores obtidos variaram de acordo com a pressão de compactação, ou seja, o aumento da pressão exercida durante o processo de compactação dos BTC levou a um rearranjo das partículas, traduzindo-se numa maior compacidade e, consequentemente, maior massa volúmica. Pode assim concluir-se que os resultados do presente estudo são semelhantes aos obtidos por estes autores e, ainda que o estudo de Mansour et al. (2016) tenha sido realizado em BTC, segundo o autor, os materiais de terra encontram-se normalmente dentro desta gama de valores.

No que diz respeito às propriedades mecânicas e tendo em conta os resultados em condições *standard*, os valores obtidos na presente dissertação para o módulo de elasticidade dinâmico são inferiores aos do estudo realizado por Santos & Faria (2015), que obtiveram um módulo de 3610 ± 128 N/mm². Já no caso da resistência à tração por flexão da argamassa de assentamento avaliada nesta dissertação, os resultados são superiores, visto Santos & Faria (2015) terem obtido uma resistência de $0,3 \pm 0,0$ N/mm² para a argamassa de terra não estabilizada pré-doseada.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão da argamassa de assentamento de terra estabilizada são semelhantes aos do estudo realizado por Gomes et al. (2014) que obteve resistências aos 7 dias de $0,90 \pm 0,05$ N/mm² para argamassas com solo de Badajoz estabilizadas com 25% de cal hidráulica natural e aos do estudo realizado por Santos & Faria (2015) que obtiveram uma resistência à

compressão de $1,1 \pm 0,1$ N/mm² para a argamassa não estabilizada pré-doseada para reboco interior. Gomes et al. (2014) avaliou ainda a resistência à compressão de uma argamassa estabilizada com a mesma percentagem de cal hidráulica natural, mas com solo de Montemor-o-Novo, obtendo uma resistência aos 7 dias de $0,52 \pm 0,01$ N/mm². Comparando os resultados obtidos pelo autor, constata-se que a composição do solo influencia a resistência da argamassa, já que para a mesma percentagem de ligante, a resistência obtida para a argamassa com solo de Montemor-o-Novo foi inferior à constituída por solo de Badajoz e à argamassa avaliada na presente dissertação.

Oliveira et al. (2007) avaliou a resistência à compressão de uma argamassa de assentamento constituída por cal hidratada, solo de Aveiro e areia ao traço 1:1:2 em volume, tendo obtido uma resistência de $1,02 \pm 0,05$ N/mm². Apesar da resistência à compressão da argamassa avaliada na presente dissertação ser ligeiramente superior, a diferença é pouca significativa. Além disso, o facto da argamassa caracterizada por Oliveira et al. (2007) ser estabilizada por adição de cal, não permite relacionar diretamente os resultados.

Um estudo realizado por Mansour et al. (2016) refere que tipicamente os materiais de terra apresentam valores de condutibilidade térmica entre 0,62 e 1,48 W/(m.K), dependendo da massa volúmica aparente. Os valores de condutibilidade térmica da argamassa de terra estabilizada (0,69 e 0,98 W/(m.K), para cura *standard* e húmida, respetivamente) são semelhantes aos obtidos por Mansour et al. (2016) em blocos de terra não estabilizados, onde para massas volúmicas de 1,72 e 1,89 kg/dm³ foram obtidas condutibilidades térmicas de 0,75 e 1,00 W/(m.K), respetivamente.

6.4.2 Blocos de terra comprimida

Ao longo dos anos diversos estudos têm avaliado a massa volúmica aparente de BTC estabilizados e não estabilizados sendo visível uma grande semelhança entre os resultados obtidos por vários autores (Figura 6.2).

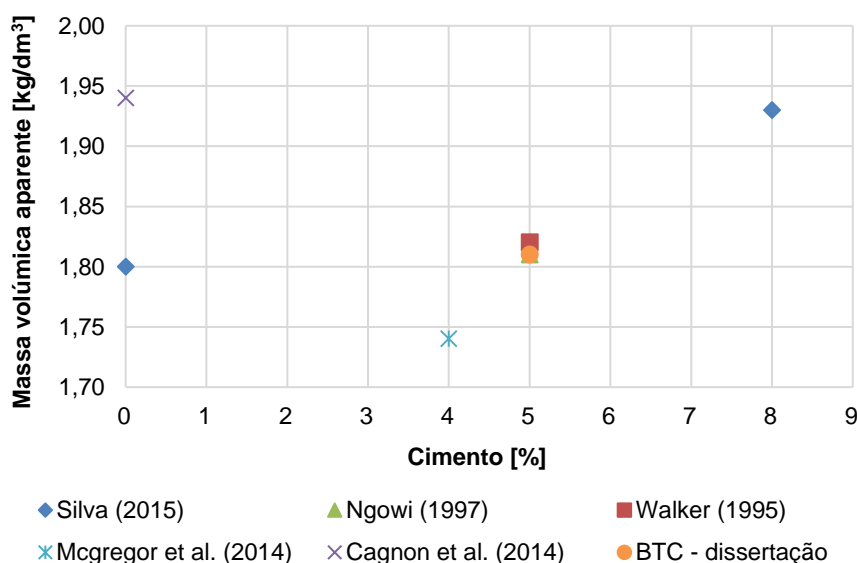


Figura 6.2 - Comparação da massa volúmica do BTC analisado com as referidas por outros autores

Comparando os resultados da presente dissertação com os obtidos por Silva (2015) (BTC não estabilizados - 1,80 kg/dm³; BTC estabilizados - 1,93 kg/dm³), Ngowi (1997) (BTC estabilizados - 1,81 kg/dm³) e Walker (1995) (BTC estabilizados - 1,82 a 1,85 kg/dm³), constata-se que a massa volúmica dos BTC avaliados no presente trabalho é da mesma ordem de grandeza dos BTC caracterizados pelos autores.

Os resultados obtidos para a massa volúmica aparente dos BTC são ainda semelhantes aos do estudo realizado por McGregor et al. (2014) que obteve uma massa volúmica de 1,74±0,04 kg/dm³ e 1,75±0,01 kg/dm³ para blocos obtidos por compactação mecânica estabilizados com 4% de cimento Portland CEM I e 4% de cal aérea CL90, respetivamente, e aos do estudo realizado por Cagnon et al. (2014), que obteve uma massa volúmica de 1,94±0,0 kg/dm³ para blocos não estabilizados obtidos por compactação mecânica.

Além disso, a massa volúmica dos BTC avaliados na presente dissertação encontra-se ainda dentro da gama de valores (1,61 e 2,19 kg/dm³) que, segundo Mansour et al. (2016), é usual para este tipo de materiais de terra.

Tal como referido em 3.3, a resistência à compressão é avaliada por vários autores maioritariamente segundo dois procedimentos distintos: blocos inteiros na horizontal (Figura 6.3 - à esquerda) ou meios blocos sobrepostos (Figura 6.3 - à direita).

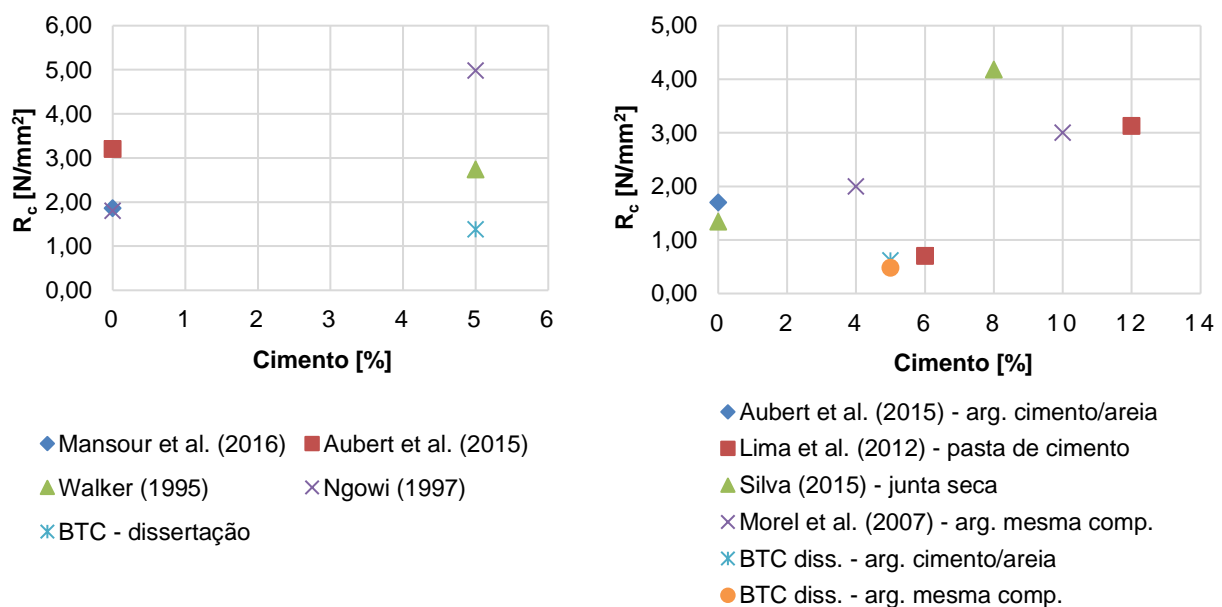


Figura 6.3 - Comparação da resistência à compressão obtida através do ensaio de blocos inteiros - horizontal (à esq.) e meios BTC sobrepostos (à dir.) com as referidas por outros autores

Os valores de resistência à compressão, que resultaram do ensaio direto dos BTC na horizontal de acordo com as normas DIN 18945 (NABau, 2013b) e UNE 41410 (AENOR, 2008), são inferiores aos do estudo realizado por Mansour et al. (2016), que obteve uma resistência à compressão de 1,86 N/mm² para BTC não estabilizados com massa volúmica de 1,91 kg/dm³, obtidos por compactação mecânica, e

aos do estudo realizado por Aubert et al. (2015), que obteve uma resistência à compressão de 3,2 N/mm² através do ensaio direto na horizontal de blocos de terra não estabilizados, com 105x62x222 [mm], obtidos por extrusão.

Aubert et al. (2015) avaliou também a resistência à compressão de dois meios blocos sobrepostos, não estabilizados e obtidos por extrusão, interligados por uma junta de argamassa de cimento e areia, tendo obtido uma resistência de 1,7 N/mm². Além do ensaio de dois meios blocos sobrepostos, Aubert et al. (2015) avaliou a resistência à compressão de blocos inteiros na vertical, obtendo uma resistência de 2,4 N/mm². Em ambos os casos, as resistências obtidas são superiores às verificadas no presente estudo, sendo que o facto da composição e fabrico dos blocos ser diferente não permite uma comparação direta de resultados.

Além de caracterizar uma argamassa de assentamento, Oliveira et al. (2007) determinou também a resistência à compressão de provetes cilíndricos, obtidos por corte rotativo a partir de adobes de uma construção parcialmente demolida em Aveiro (onde os adobes são geralmente estabilizados com cal aérea mas realizados com terras bastante arenosas). A resistência à compressão dos BTC ensaiados no presente estudo, de acordo com as normas DIN 18945 (NABau, 2013b) e UNE 41410 (AENOR, 2008), é superior à do estudo realizado por Oliveira et al. (2007), que obteve uma resistência de 1,13±0,16 N/mm² para os adobes avaliados. A maior resistência observada pode em parte dever-se ao processo de compactação durante a produção dos BTC (face apenas à moldagem dos adobes). No entanto, não sendo conhecida a composição dos adobes, podem existir outros fatores que justifiquem a resistência superior dos BTC.

Os BTC avaliados na presente dissertação de acordo com a norma DIN 18945 (NABau, 2013b) e UNE 41410 (AENOR, 2008) apresentam uma resistência à compressão inferior às obtidas por Walker (1995) para BTC estabilizados com 5% de cimento (2,74 N/mm²) e Ngowi (1997) para BTC estabilizados com a mesma percentagem de ligante (4,98 N/mm²) e não estabilizados (1,80 N/mm²).

Lima et al. (2012) avaliou a resistência à compressão de BTC obtidos por compactação manual e estabilizados através da adição de 6 e 12% de cimento Portland CEM II/B-L 32,5N. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 8492 (ABNT, 2012c) em dois meios blocos sobrepostos interligados por pasta de cimento, tendo o autor obtido resistências de 0,70±0,08 N/mm² e 3,13±0,21 N/mm², para os BTC estabilizados com 6 e 12% de cimento, respetivamente. Os BTC interligados por uma argamassa de cimento e areia ensaiados na presente dissertação apresentam uma resistência idêntica à obtida por Lima et al. (2012) para os blocos estabilizados com 6% de cimento. De facto, essa diferença torna-se ainda menos significativa tendo em conta que os BTC caracterizados no presente estudo foram estabilizados através da adição de 5% de cimento. Comparando os resultados obtidos por Lima et al. (2012) verifica-se ainda que duplicando a quantidade de cimento utilizada para estabilizar o solo a resistência dos blocos aumenta significativamente.

Também Silva (2015) avaliou a resistência à compressão de BTC estabilizados e não estabilizados tendo por base norma NBR 8492 (ABNT, 2012c). No entanto, segundo o autor o uso de argamassa entre os dois meios blocos tende a subestimar o valor real da resistência à compressão. Tendo isso em conta,

Silva (2015) determinou a resistência à compressão de dois meios blocos sobrepostos com junta seca, tendo obtidos valores de $4,18 \text{ N/mm}^2$ e $1,34 \text{ N/mm}^2$ para BTC estabilizados com 8% de cimento (relativamente à massa de solo) e não estabilizados, respetivamente. Os resultados obtidos no presente estudo para a resistência à compressão de meios BTC sobrepostos são inferiores. No entanto, a utilização de uma argamassa com a mesma composição dos BTC ou de cimento e areia entre os dois meios blocos, não permite comparar diretamente os resultados.

Um estudo realizado por Gomes et al. (2014) avaliou a resistência à compressão de dois tipos de BTC obtidos por compactação mecânica, interligados por uma argamassa com base em terra como mencionado no Quadro 3.2. Também Morel et al. (2007) realizou um estudo semelhante, mas com dois meios blocos produzidos por compactação manual e constituídos por solo estabilizado por 4 a 10% de cimento interligados por uma argamassa com a mesma composição. Os resultados obtidos na presente dissertação são inferiores aos do estudo realizado por Gomes et al. (2014), que obteve uma resistência de $0,88 \pm 0,09 \text{ N/mm}^2$ e $4,22 \pm 0,57 \text{ N/mm}^2$ para BTC produzidos em Montemor-o-Novo e em Badajoz, respetivamente, e aos do estudo realizado por Morel et al. (2007) que obteve uma gama de valores entre 2 e 3 N/mm^2 .

Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009) avaliaram a resistência à compressão de provetes de alvenaria de BTC, obtidos por compactação mecânica e constituídos por solo estabilizado por adição de 5% de cimento, interligados por uma argamassa de cimento e areia ao traço 1:5 em volume. Segundo o autor, alternativamente, os blocos poderiam ter sido interligados por uma argamassa de cimento, solo e areia ao traço 1:2:6 em volume. Os resultados obtidos na presente dissertação são inferiores aos do estudo realizado por Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009) que obtiveram uma resistência de $2,5 \text{ N/mm}^2$. No entanto, o processo mecânico de produção dos blocos e o facto da argamassa que os interliga não apresentar a mesma composição pode explicar as maiores resistências obtidas.

Oliveira et al. (2007) avaliou ainda a resistência à compressão de provetes de alvenaria de blocos de adobe, assentes por uma argamassa de cal hidratada, solo de Aveiro e areia ao traço 1:1:2 em volume. A resistência à compressão dos provetes de BTC avaliados no presente estudo é inferior à dos provetes de adobe ensaiados por Oliveira et al. (2007) que obteve uma resistência de $1,17 \pm 0,14 \text{ N/mm}^2$. Apesar de não ser possível realizar uma comparação direta dos resultados, tendo em conta as resistências obtidas por Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009) e Oliveira et al. (2007), pode afirmar-se que os provetes de alvenaria de BTC avaliados na presente dissertação apresentaram uma baixa resistência à compressão.

6.4.3 Alvenarias de blocos de terra comprimida

Os resultados verificados para a condutibilidade térmica dos BTC que constituem os muretes avaliados na presente dissertação, antes de um período de precipitação, são próximos dos obtidos por Silva (2015) para BTC estabilizados ($0,87 \text{ W/(m.K)}$) e não estabilizados ($0,65 \text{ W/(m.K)}$), caracterizados em condições *standard*. De facto, se se tiver em conta os desvios padrão obtidos na presente dissertação, verifica-se que a diferença entre os dois estudos é pouco significativa. No entanto, as diferentes condições de ensaio em que os BTC foram avaliados e o facto de apresentarem uma composição também ela diferente, não permite uma comparação direta dos resultados.

Santos (2014) avaliou a deformabilidade de uma argamassa de terra não estabilizada pré-doseada para reboco interior, aplicada em diferentes tipos de suporte. No caso da aplicação da argamassa sobre alvenaria de adobe, a deformabilidade obtida através do ensaio de choque de esfera foi de 19 ± 2 mm no Verão e 21 ± 1 mm no Inverno. Comparando com os resultados obtidos na presente dissertação, verifica-se que os BTC apresentam um comportamento bastante semelhante ao da argamassa de terra no que diz respeito a deformabilidade. Constatou-se também que em ambos os casos uma maior HR se traduz numa maior deformabilidade.

Os valores obtidos para a resistência superficial dos blocos dos dois muretes ensaiados com o auxílio de um esclerómetro pendular são ligeiramente superiores aos do estudo realizado por Faria et al. (2014) que obteve uma resistência superficial de 38 ± 2 graus Vickers para um murete de alvenaria de adobe revestido por uma argamassa de terra não estabilizada pré-doseada para reboco interior. Enquanto no fabrico de BTC, a terra húmida colocada em moldes é sujeita a um processo de compactação, no caso de fabrico de adobes a terra não é compactada, sendo os blocos simplesmente colocados a secar à temperatura ambiente. O facto do processo de compactação conferir uma maior rigidez ao bloco e, consequentemente, aos muretes, pode em parte explicar o maior ressalto do pêndulo observado no presente estudo.

No que diz respeito à velocidade de propagação de ultrassons obtida através do método direto, os resultados para os BTC que constituem os muretes avaliados na presente dissertação são inferiores aos do estudo realizado por Gomes (2015), que obteve velocidades de $884,1 \pm 105,7$ m/s e $1142,0 \pm 228,7$ m/s para os BTC de Montemor-o-Novo e de Badajoz, respetivamente. Ainda que a diferença entre os resultados dos dois estudos não seja muito significativa, tendo-se em conta os desvios padrão obtidos, a diferente composição dos BTC não permite uma comparação direta de valores.

Também Silva (2015) avaliou a velocidade de propagação de ultrassons através do mesmo método, tendo obtido velocidades de $1581,8$ m/s e $1009,7$ m/s para BTC estabilizados com 8% de cimento e não estabilizados, respetivamente. Os BTC dos muretes avaliados no presente estudo apresentam uma velocidade inferior à obtida por Silva. No entanto, tal como mencionado anteriormente a diferente composição dos BTC não permite uma comparação direta das velocidades de propagação.

Quanto aos coeficientes de absorção dos BTC que constituem os muretes avaliados através do ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten, os valores obtidos são superiores aos do estudo realizado por Faria et al. (2014), que obteve um coeficiente após uma hora de ensaio de $0,3 \pm 0,0$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{t}^{0,5})$ para um murete em alvenaria de adobe. Um outro estudo realizado por Gomes (2015) avaliou o coeficiente de absorção de dois tipos de BTC produzidos por compactação mecânica, tendo obtido um coeficiente após cinco minutos de ensaio de $1,9 \pm 0,5$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{t}^{0,5})$ e $0,4 \pm 0,1$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{t}^{0,5})$ para BTC de Montemor-o-Novo e de Badajoz, respetivamente. Além das diferentes composições dos elementos de terra avaliados, também o facto do coeficiente de absorção ter sido determinado em diferentes períodos do ensaio dificulta a comparação de resultados. No entanto, é possível observar uma semelhança entre os valores obtidos na presente dissertação para o coeficiente de absorção e os resultados verificados por Gomes (2015) para BTC de Montemor-o-Novo.

7. CONCLUSÕES

7.1 Considerações finais

Com a presente dissertação pretende-se contribuir para um maior conhecimento das características de blocos de terra, nomeadamente BTC, de argamassas de assentamento de blocos de terra e das respetivas alvenarias. Para tal, analisou-se a norma alemã DIN 18946 (NABau, 2013a), apresentando-se os principais aspetos da norma específica para argamassas de assentamento de terra não estabilizadas e a sua relação com a norma europeia e portuguesa NP EN 998-2 (IPQ, 2010) para argamassas de assentamento industriais. Abordou-se ainda a normalização existente a nível mundial para caracterização de BTC estabilizados e não estabilizados, apresentando-se os principais requisitos e procedimentos de ensaio das normas alemã DIN 18945 (NABau, 2013b), espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008), colombiana NTC 5324 (ICONTEC, 2004) e brasileira NBR 8491 (ABNT, 2012a).

A campanha experimental, que decorreu após a análise da normalização existente para este tipo de materiais, permitiu avaliar as características de um tipo de BTC estabilizados por adição de cimento e de uma argamassa de assentamento realizada com a mesma composição em termos de constituintes sólidos, utilizados como caso de estudo. A argamassa foi caracterizada de acordo com a norma DIN 18946 (NABau, 2013a) e os BTC segundo as normas DIN 18945 (NABau, 2013b), UNE 41410 (AENOR, 2008) e NTC 5324 (ICONTEC, 2004), que definem os requisitos e procedimentos de ensaio para BTC não estabilizados, estabilizados quimicamente ou não estabilizados e estabilizados por adição de cimento, respetivamente. Tendo em conta que as normas referidas são todas relativamente recentes e que a determinação de grande parte das características é remetida para normalização existente, recorreu-se ainda a outros documentos normativos e procedimentos estabelecidos propositadamente.

Da comparação entre a DIN 18946 (NABau, 2013a) e a NP EN 998-2 (IPQ, 2010) constata-se que as duas normas específicas para argamassas de assentamento apresentam a maior parte das propriedades em comum, remetendo na maior parte dos casos para os mesmos procedimentos de ensaio.

As normas DIN 18945 (NABau, 2013b), UNE 41410 (AENOR, 2008), NTC 5324 (ICONTEC, 2004) e NBR 8491 (ABNT, 2012a) avaliam as propriedades geométricas, massa volúmica e constituintes da terra, propriedades mecânicas, comportamento face à água e gelo, propriedades térmicas e reação ao fogo, realçando-se dois aspetos comuns a todas: as dimensões e a resistência à compressão. No que diz respeito à determinação da resistência à compressão as normas NTC 5324 (ICONTEC, 2004) e NBR 8491 (ABNT, 2012a) apresentam um procedimento de ensaio semelhante, diferindo no tipo de ligação entre os dois meios blocos. As normas UNE 41410 (AENOR, 2008) e DIN 18945 (NABau, 2013b) permitem ensaiar o bloco inteiro diretamente entre os pratos da prensa, com a particularidade de que segundo a norma alemã (NABau, 2013b), para que o ensaio direto seja possível, o bloco deverá apresentar uma altura nominal superior ou igual a 71 mm.

O valor de massa volúmica no estado fresco e retração linear por secagem da argamassa de terra cumprem o estabelecido na norma DIN 18946 (NABau, 2013a), embora esta seja para aplicação apenas a argamassas não estabilizadas. No entanto, o valor obtido para a consistência por espalhamento ficou

abaixo do imposto pela norma (NABau, 2013a). No entanto, decidiu-se não adicionar mais água de amassadura uma vez que a argamassa apresentava trabalhabilidade considerada suficiente para aplicação no assentamento.

Os resultados obtidos na presente dissertação permitem concluir que as condições de temperatura e humidade relativa têm uma influência significativa nas características da argamassa de terra estabilizada e dos BTC. O elevado potencial higroscópico dos materiais de terra aliado a uma elevada humidade relativa traduz-se num maior teor de água, que produz algumas diferenças, como por exemplo a obtenção de maiores condutibilidades térmicas.

No que diz respeito à massa volúmica aparente, a argamassa de terra e os BTC podem ser classificados de acordo com as normas DIN 18946 (NABau, 2013a) e DIN 18945 (NABau, 2013b), respetivamente, como pertencentes à classe 1,8.

A argamassa em condições de cura húmida apresentou uma maior resistência à tração por flexão que se considera ser devido ao maior teor em água da argamassa lhe conferir uma maior deformabilidade.

Em termos de resistência à compressão, a argamassa poderia ser classificada de acordo com a norma DIN (NABau, 2013a) como sendo da classe M0 e da classe M1 de acordo com a NP EN 998-2 (IPQ, 2010). Os BTC podem ser classificados segundo a UNE 41410 (AENOR, 2008) como sendo da classe BTC 1. Tendo em conta os valores de resistência obtidos, as normas DIN 18945 (NABau, 2013b) e NTC 5324 (ICONTEC, 2004) não permitem a classificação segundo classes de resistência. No entanto, de acordo com a norma alemã, os blocos seriam indicados para aplicação em paredes não resistentes. Mas relembra-se que os blocos foram realizados por pessoal não especializado e com terras escavadas do local, sem formulação muito otimizada. Também as condições de cura dos BTC não foram otimizadas. Dessa forma, muito poderia ser feito com vista a otimizar as características dos BTC, ao nível de formulação e produção. No entanto, demonstra-se a possibilidade dos BTC virem a ser fabricados em pequenas unidades de produção e por pessoal sem grande especialização.

No que diz respeito aos resultados obtidos *in situ* para os dois muretes da Estação Experimental, conclui-se que a humidade relativa do ar, a humidade ascensional e a ação direta da água sobre os muretes influenciam as suas características. Dependendo das características analisadas esta influência pode ser positiva ou negativa. Além disso, o facto dos resultados obtidos nos dois muretes apresentarem um desvio padrão relativamente baixo apesar de terem sido construídos por pessoal sem grande experiência profissional, demonstra a viabilidade e facilidade de execução deste tipo de alvenaria por parte de mão-de-obra não muito especializada.

Finalizada a presente dissertação, considera-se que os objetivos iniciais de contribuir para um maior conhecimento das características essencialmente físicas de blocos de terra comprimida, argamassas de assentamento de blocos de terra e alvenarias de terra foram cumpridos.

Tendo em conta os resultados obtidos na caracterização dos BTC e da argamassa de terra, constata-se que apresentam propriedades interessantes para serem utilizados como materiais de construção. Além disso, o baixo custo de produção aliado à atual consciencialização face a uma construção mais eco-

eficiente, pode suscitar um maior interesse a nível nacional neste tipo de construção (por exemplo pela utilização de paredes de elevada massa para otimizar aspetos passivos), criando oportunidades de investimento na produção e aplicação de BTC com recurso a solos locais por parte de pequenas e médias empresas.

Salienta-se assim a importância de, à semelhança do que já existe em outros países, como a Colômbia, o Brasil, a Espanha e a Alemanha, se estabelecerem normas nacionais que permitam caracterizar e classificar as argamassas de assentamento de terra e os blocos de terra comprimida produzidos em Portugal.

Tal como referido anteriormente, uma parte dos resultados obtidos na presente dissertação foram já apresentados em dois congressos nacionais realizados em Coimbra e Lisboa.

7.2 Propostas para trabalhos futuros

De modo a confirmar alguns resultados obtidos e aprofundar o conhecimento das características deste tipo de materiais, dando assim continuidade ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugerem-se alguns estudos futuros.

- Para um melhor conhecimento do solo que constitui a argamassa de assentamento e os BTC, é fundamental a realização de ensaios de caracterização dos solos.
- Com vista a melhorar as características dos BTC e da argamassa de assentamento, sugere-se um estudo que permita otimizar a formulação e condições de cura destes materiais.
- Aconselha-se a realização de uma maior variedade de ensaios para melhorar a caracterização da argamassa de terra e sobretudo dos BTC, já que na presente dissertação se avaliou essencialmente a massa volúmica, condutibilidade térmica e resistência à compressão dos blocos.
- Na continuação da caracterização dos BTC, aconselha-se a realização do ensaio para determinação da resistência inicial ao corte de acordo com a norma EN 1052-3 (CEN, 2002a), visto que segundo a norma UNE 41410 (AENOR, 2008) se trata de um parâmetro importante para BTC utilizados em paredes resistentes. Aconselha-se também a realização do ensaio descrito por Lima et al. (2012), que permite estimar a resistência ao corte a partir das curvas força-deformação obtidas através de ensaios de compressão diagonal em muretes.
- Aconselha-se ainda a caracterização de BTC produzidos com diferentes tipos de solo, diferente estabilização e teores variáveis dos agentes estabilizadores para que assim se obtenha uma maior gama de resultados no que diz respeito à caracterização dos blocos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2012a). NBR 8491: 2012 - *Tijolo de solo-cimento - Requisitos*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ABNT (2012c). NBR 8492: 2012 - *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ABNT (2012b). NBR 10833: 2012 - *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. Rio de Janeiro, ABNT.
- AENOR (1993). UNE 103204: 1993 - *Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico*. Madrid, AENOR.
- AENOR (2006). UNE 103205: 2006 - *Determinación del contenido de sales solubles de un suelo*. Madrid, AENOR.
- AENOR (2008). UNE 41410: 2008 - *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid, AENOR.
- AFNOR (2001). NF XP P13-901: 2001 - *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Définitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de réception*. Paris, AFNOR.
- AFNOR (1992). NF P18-559: 1992 - *Granulats - Mesure de la masse volumique des sables et gravillons dans l'huile de paraffine*. Paris, AFNOR.
- ASTM (2008). ASTM C805: 2008 - *Standard test method for rebound hammer of hardened concrete*. United States, ASTM.
- Aubert, J.; Maillard, P.; Morel, J.; Al Rafii, M. (2015). *Towards a simple compressive strength test for earth bricks ?* Materials and Structures, vol. 49, pp. 1641-1654.
- Barnes, R. (s.d.). Site Testing Equipment - Porositester. Sydney.
- Bruno, P.; Faria, P.; Candeias, A.; Mirão, J. (2010). *Earth mortars from on pre-historic habitat settlements in south Portugal. Case studies*. J. Iberian Archaeology, vol. 13, pp. 51-67.
- BSI (2005). BS 5628-1: 2005 - *Code of practice for the use of masonry. Structural use of unreinforced masonry*. London, BSI.
- Cagnon, H.; Aubert, J. E.; Coutand, M.; Magniont, C. (2014). *Hygrothermal properties of earth bricks*. Energy & Buildings, vol. 80, pp. 208-217.
- CEN (2011b). EN 772-1: 2011 - *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength*. Brussels, CEN.
- CEN (2011c). EN 772-11: 2011 - *Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry unit*. Brussels, CEN.
- CEN (2001b). EN 772-13: 2001 - *Methods of test for masonry units - Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone)*. Brussels, CEN.

CEN (2011a). EN 772-16: 2011 - *Methods of test for masonry units - Part 16: Determination of dimensions*. Brussels, CEN.

CEN (1998a). EN 1015-2: 1998 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels, CEN.

CEN (1999a). EN 1015-3: 1999 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels, CEN.

CEN (1998b). EN 1015-4: 1998 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by Plinger Penetration)*. Brussels, CEN.

CEN (2006b). EN 1015-6: 2006 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels, CEN.

CEN (1998c). EN 1015-7: 1998 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Brussels, CEN.

CEN (2006a). EN 1015-10: 1999/A1: 2006 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. Brussels, CEN.

CEN (1999b). EN 1015-11: 1999 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, CEN.

CEN (2002a). EN 1052-3: 2002 - *Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength*. Brussels, CEN.

CEN (2002b). EN 1745: 2002 - *Masonry and masonry products - Methods for determining design thermal values*. Brussels, CEN.

CEN (2001a). EN ISO 12572: 2001 - *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*. Brussels, CEN.

CEN (2007). EN 13501-1: 2007 - *Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests*. Brussels, CEN.

CEN (2013). EN 16302: 2013 - *Conservation of cultural heritage. Test methods. Measurement of water absorption by pipe method*. Brussels, CEN.

DIN (1998). DIN 4102-1: 1998 - *Fire behaviour of building materials and elements - Part 1: Classification of building materials. Requirements and testing (em alemão)*. Berlin, DIN-Sprachendienst.

DIN (1994). DIN 4102-4: 1994 - *Fire behaviour of building materials and elements - Part 4: Overview and design of classified building materials, elements and components (em alemão)*. Berlin, DIN-Sprachendienst.

DIN (2013). DIN V 4108-4: 2013 - *Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values (em alemão)*. Berlin, DIN-Sprachendienst.

Faria, P.; Santos, T.; Silva, V. (2014). *Earth-based mortars for masonry plastering*. In 9th International Masonry Conference. 7-9 July 2014, (CD, ID 1333). Guimarães.

- Gomes, N. (2015). *Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias ecoeficientes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. FCT NOVA. Lisboa.
- Gomes, N.; Faria, P.; Silva, V. (2014). *Caracterização de argamassas de assentamento e de alvenarias de blocos de terra*. In Argamassas 2014 - 1º Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. 5 e 6 de Junho 2014, ITeCons, (CD, ID 03). Coimbra.
- Henriques, F. (2011). *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. FCT NOVA. Lisboa.
- ICONTEC (2004). NTC 5324: 2004 - *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de Ensayo. Condiciones de entrega*. Bogotá, ICONTEC.
- IPQ (2010). NP EN 998-2: 2010 - *Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 2: Argamassas para alvenarias*. Caparica, IPQ.
- IPQ (2008). NP EN 1015-19: 2008 - *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria - Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*. Caparica, IPQ.
- IPQ (2007). NP EN 12504-4: 2007 - *Ensaio de betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons*. Caparica, IPQ.
- IPQ (2006). NP EN 14146: 2006 - *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica, IPQ.
- Jayasinghe, C.; Mallawaarachchi, R. (2009). *Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials*. Materials and Design, vol. 30, pp. 3859-3868.
- Jorge, F.; Fernandes, M.; Correia, M. (2005). *Arquitectura de Terra em Portugal*. 1ª edição, Argumentum. Lisboa.
- Lima, S.; Varum, H.; Sales, A.; Neto, V. (2012). *Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash*. Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 829-837.
- LNEC (1980). FE Pa 25: *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes - Ensaio de choque de esfera*. Lisboa.
- LNEC (2002). FE Pa 39: *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa.
- LNEC (2010). FE Pa 43: *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes - Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultrassons*. Lisboa.
- Mansour, M.; Jelidi, A.; Cherif, A.; Jabrallah, S. (2016). *Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)*. Construction and Building Materials, vol. 104, pp. 44-51.
- McGregor, F.; Heath, A.; Fodde, E.; Shea, A. (2014). *Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks*. Building and Environment, vol. 75, pp. 11-18.
- Morel, J.; Pkila, A.; Walker, P. (2007). *Compressive strength testing of compressed earth blocks*. Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 303-309.

NABau (2013b). DIN 18945: 2013 - *Earth blocks - Terms and definitions, requirements, test methods (em alemão)*. Berlin, NABau.

NABau (2013a). DIN 18946: 2013 - *Earth masonry mortar - Terms and definitions, requirements, test methods (em alemão)*. Berlin, NABau.

Ngowi, A. (1997). *Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana*. Construction and Building Materials, vol. 11, pp. 1-7.

Oliveira, D.; Varum, H.; Silva, R.; Pereira, H.; Lourenço, P.; Costa, A. (2007). *Caracterização experimental do comportamento diferido de alvenaria de adobe*. In V Seminário de Arquitetura em Terra em Portugal, pp. 71-74. Aveiro.

Olivier, M.; Mesbah, A.; Gharbi, Z.; Morel, J. (1997). *RILEM TC 164-EBM: Mechanics of earth as a building material - Mécanique de la construction en terre, test method for strength test on blocks of compressed earth*. Materials and Structures, vol. 30, pp. 515-517.

Ribeiro, D.; Faria, P.; Silva, V. (2016). *Alvenarias de blocos de terra - Caracterização das argamassas de assentamento*. In Argamassas 2016 - 2º Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. 16-17 Junho 2016, ITeCons, ID 03, pp. 96-107. Coimbra.

Ribeiro, D.; Silva, V.; Faria, P. (2016). *Caracterização de blocos de terra comprimida*. In TEST&E 2016 - 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil. 4-6 Julho 2016, RELACRE, ID 01014. Lisboa.

Santos, T.; Faria, P. (2015). *Avaliação de argamassas de terra para rebocos interiores*. Tech Itt-Estruturas e Construção, vol.13 (36), Set. 2015, pp. 18-30.

Santos, T. (2014). *Argamassas de terra para rebocos interiores - Ensaios de caracterização e influência da formulação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. FCT NOVA. Lisboa.

Silva, M. (2015). *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. IST. Lisboa.

Vozár, L. (1996). *A computer-controlled apparatus for thermal conductivity measurement by the transient hot wire method*. Journal of Thermal Analysis, vol. 46, pp. 495-505.

Walker, P. (1995). *Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks*. Cement and Concrete Composites, vol. 17, pp. 301-310.

ANEXOS - RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS

A.1. Resultados individuais obtidos na caracterização da argamassa de assentamento com base em terra

Consistência por espalhamento e penetrômetro

Espalhamento [mm]		Penetrômetro [cm]
156	155	1,3
156	159	1,4
162	153	1,3
159	160	-
Média	157,5	1,3
Desv. Pad.	2,8	0,05

Massa volúmica aparente

Provete		m (kg)	L (dm)	b (dm)	h (dm)	Volume [dm³]	Massa Volúmica [kg/dm³]	Média [kg/dm³]	Desv. Pad. [kg/dm³]
Cura Húmida 7 dias	1	0,51	1,60	0,40	0,40	0,26	1,98	1,98	0,00
	2	0,52	1,61	0,41	0,40	0,26	1,99		
	3	0,51	1,60	0,41	0,40	0,26	1,98		
Cura Standard 7 dias	4	0,51	1,60	0,40	0,41	0,27	1,92	1,91	0,02
	5	0,51	1,61	0,40	0,41	0,27	1,92		
	6	0,50	1,60	0,40	0,41	0,26	1,88		
Cura Húmida 28 dias	7	0,50	1,61	0,40	0,40	0,26	1,90	1,88	0,03
	8	0,48	1,61	0,40	0,41	0,26	1,84		
	9	0,51	1,60	0,40	0,42	0,27	1,90		
Cura Standard 28 dias	10	0,45	1,60	0,40	0,41	0,26	1,71	1,71	0,01
	11	0,44	1,60	0,40	0,40	0,26	1,71		
	12	0,45	1,59	0,40	0,41	0,26	1,70		

Módulo de elasticidade dinâmico

Provete		m (g)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	E _{din} [N/mm²]				Média [N/mm²]	Desv. Pad. [N/mm²]
Cura Standard 7 dias	4	510,0	160,1	40,0	41,4	2598	2566	2468	2335	2354	155
	5	512,2	160,8	40,1	41,5	2236	2336	2250	2606		
	6	497,0	160,2	40,0	41,4	2186	2215	2234	2213		
Cura Standard 28 dias	10	447,7	159,8	39,9	41,1	2078	2069	1973	2052	2048	81
	11	443,5	159,9	40,5	40,5	1926	2087	2119	2203		
	12	447,0	159,4	40,2	41,1	2082	1932	2106	1953		

Resistência à tração por flexão

Provete		F _t [N]	R _t [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Cura Húmida 7 dias	1	174,91	0,66	0,64	0,03
	2	158,40	0,60		
	3	173,51	0,65		
Cura Standard 7 dias	4	152,80	0,57	0,54	0,02
	5	139,65	0,53		
	6	139,64	0,52		
Cura Húmida 28 dias	7	219,90	0,83	0,78	0,05
	8	187,12	0,71		
	9	211,49	0,79		
Cura Standard 28 dias	10	153,22	0,57	0,61	0,04
	11	157,14	0,59		
	12	180,12	0,67		

Resistência à compressão

Provete		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Cura Húmida 7 dias	1	1456,93	0,91	0,87	0,04
		1372,13	0,86		
	2	1489,95	0,93		
		1415,23	0,88		
	3	1309,72	0,82		
Cura Standard 7 dias	4	1494,15	0,93	0,94	0,03
		1410,19	0,88		
	5	1587,62	0,99		
		1506,74	0,94		
	6	1533,33	0,96		
Cura Húmida 28 dias	7	2046,27	1,28	1,29	0,02
		2013,77	1,26		
	8	2081,28	1,30		
		2115,18	1,32		
	9	2084,92	1,30		
Cura Standard 28 dias	10	2381,85	1,49	1,45	0,05
		2275,40	1,42		
	11	2384,93	1,49		
		2445,72	1,53		
	12	2262,24	1,41		
		2155,51	1,35		

Condutibilidade térmica

Provete Circular		λ [W/m.K]	Média [W/m.K]	Desv. Pad. [W/m.K]
Cura Húmida 28 dias	1	0,92	0,98	0,04
	2	0,99		
	3	1,03		
Cura Standard 28 dias	4	0,71	0,69	0,02
	5	0,69		
	6	0,66		

A.2. Resultados individuais obtidos na caracterização dos BTC

Massa volúmica aparente

Bloco		m (kg)	L (dm)	b (dm)	h (dm)	Volume [dm³]	Massa Volúmica [kg/dm³]	Média [kg/dm³]	Desv. Pad. [kg/dm³]
Câmara Húmida	1	6,77	2,96	1,4	0,9	3,79	1,79	1,80	0,06
	2	7,36	2,97	1,4	0,9	3,92	1,88		
	3	6,86	2,96	1,4	0,9	3,82	1,80		
	4	7,13	2,95	1,4	0,9	3,86	1,85		
	5	7,23	2,96	1,4	0,9	3,96	1,82		
	6	6,35	2,95	1,4	0,9	3,74	1,70		
	7	7,23	2,96	1,4	1,0	3,99	1,81		
	8	6,72	2,96	1,4	0,9	3,91	1,72		
	9	7,17	2,95	1,4	0,9	3,89	1,85		
Câmara Standard	10	6,90	2,96	1,4	0,9	3,85	1,79	1,81	0,06
	11	7,23	2,97	1,4	0,9	3,82	1,89		
	12	7,26	2,97	1,4	1,0	3,99	1,82		
	13	7,22	2,96	1,4	0,9	3,93	1,84		
	14	6,98	2,97	1,4	0,9	3,87	1,81		
	15	7,28	2,96	1,4	0,9	3,88	1,88		
	16	7,17	2,97	1,4	0,9	3,88	1,85		
	17	6,83	2,97	1,4	0,9	3,96	1,73		
	18	6,53	2,95	1,4	0,9	3,82	1,71		

Resistência à compressão - DIN 18945 e UNE 41410

Bloco		F _c [N]	R _c [N/mm²]	Média [N/mm²]	Desv. Pad. [N/mm²]
Câmara Húmida	1	15719,40	0,67	0,88	0,10
	3	20503,46	0,87		
	4	23821,70	1,01		
	6	21195,90	0,90		
	7	21502,50	0,91		
	8	20804,74	0,88		
	9	21871,26	0,93		

Resistência à compressão - DIN 18945 e UNE 41410 (cont.)

Bloco		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Standard	10	28856,40	1,23	1,38	0,24
	11	25800,20	1,10		
	13	25975,20	1,10		
	14	36749,80	1,56		
	15	31244,20	1,33		
	17	37098,10	1,58		
	18	41811,90	1,78		

Resistência à compressão - NTC 5324

Provete		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Standard	1	12613,47	0,62	0,62	0,10
	2	12309,76	0,61		
	3	15440,33	0,77		
	4	9624,13	0,48		

Resistência à compressão - Meios BTC e argamassa com a mesma composição

Provete		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Standard	1	8951,82	0,44	0,48	0,03
	2	9255,25	0,47		
	3	9752,49	0,49		
	4	10653,85	0,54		

Resistência à compressão - Provetes de alvenaria

Provete		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Standard	1	28373,90	0,68	0,52	0,10
	2	23052,81	0,55		
	3	17980,90	0,43		
	4	16682,27	0,40		
	5	22642,03	0,54		

Resistência à compressão - BTC ensaiado na vertical

Bloco		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Húmida	1	7340,87	0,58	0,51	0,14
	2	8436,95	0,67		
	3	6920,60	0,55		
	4	3357,80	0,27		
	5	6149,24	0,49		
	6	8222,60	0,65		
	7	4673,78	0,37		

Resistência à compressão - BTC ensaiado na vertical

Bloco		F _c [N]	R _c [N/mm ²]	Média [N/mm ²]	Desv. Pad. [N/mm ²]
Câmara Standard	1	3965,75	0,31	0,46	0,10
	2	5503,13	0,44		
	3	4026,83	0,32		
	4	6923,10	0,55		
	5	5946,40	0,47		
	6	7415,40	0,59		
	7	7068,50	0,56		

A.3. Resultados individuais obtidos na caracterização da alvenaria de BTC *in situ*

Condutibilidade térmica

	Antes de um período de precipitação		Após um período de precipitação	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	1,38	1,08	1,87	0,71
	1,16	0,88	1,47	0,80
	1,07	0,70	1,58	0,65
	1,12	0,83	1,94	0,65
	-	0,85	1,54	0,85
Média [W/m.K]	1,18	0,87	1,68	0,73
Desv. Pad. [W/m.K]	0,12	0,12	0,19	0,08

Ensaio de choque de esfera (Martinet-Baronnie) - Antes de um período de precipitação

	Face Sul				Face Norte			
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	21	23	17	20	19	20	15	19
	19	21	20	18	20	18	19	19
	24	24	19	19	18	18	16	17
	19	21	20	20	17	19	17	18
	21	19	17	20	-	-	-	-
	18	19	15	25	-	-	-	-
Média [mm]	20	21	18	20	18	19	17	18
Desv. Pad. [mm]	2	2	2	2	1	1	1	1
Média [mm]	21		19		18		17	
Desv. Pad. [mm]	2		2		1		1	
Média [mm]	20				18			
Desv. Pad. [mm]	2				1			
Média [mm]	19							
Desv. Pad. [mm]	2							

Ensaio de choque de esfera (Martinet-Baronnie) - Após um período de precipitação

	Face Sul				Face Norte			
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	23	23	18	22	23	21	20	20
	21	21	22	23	26	23	21	18
	25	24	21	21	21	26	20	20
	20	26	22	22	22	20	17	23
	22	22	18	24	-	-	-	-
	22	22	18	24	-	-	-	-
Média [mm]	22	23	20	23	23	23	20	20
Desv. Pad. [mm]	2	2	2	1	2	2	1	2
Média [mm]	23		21		23		20	
Desv. Pad. [mm]	2		2		2		2	
Média [mm]	22				21			
Desv. Pad. [mm]	2				2			
Média [mm]	22							
Desv. Pad. [mm]	2							

Resistência superficial por esclerômetro pendular (Sul) - Antes de um período de precipitação

	Face Sul					
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 90,5 cm	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	50	44	55	44	46	44
	52	50	50	42	47	42
	47	47	50	45	41	45
	43	53	43	50	54	43
	43	44	49	38	46	39
	43	53	58	40	45	44
Média [Vickers]	46	49	51	43	47	43
Desv. Pad. [Vickers]	4	4	5	4	4	2
Média [Vickers]	47		47		45	
Desv. Pad. [Vickers]	4		6		4	
Média [Vickers]	46					
Desv. Pad. [Vickers]	5					

Resistência superficial por esclerômetro pendular (Norte) - Antes de um período de precipitação

	Face Norte						
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 90,5 cm		
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	
	43	41	45	41	42	45	
	46	47	43	44	42	46	
	41	42	40	42	43	42	
	43	45	39	41	54	39	
	Média [Vickers]	43	44	42	42	45	43
	Desv. Pad. [Vickers]	2	2	2	1	5	3
Média [Vickers]	44		42		44		
Desv. Pad. [Vickers]	2		2		4		
Média [Vickers]	43						
Desv. Pad. [Vickers]	3						

Resistência superficial por esclerômetro pendular (Sul) - Após um período de precipitação

	Face Sul					
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 90,5 cm	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	54	58	60	55	50	51
	55	50	51	51	58	54
	51	47	53	53	54	52
	55	48	56	55	53	51
	54	58	57	46	56	50
	59	53	59	52	59	50
	Média [Vickers]	55	52	56	52	55
Desv. Pad. [Vickers]	2	4	3	3	3	1
Média [Vickers]	54		54		53	
Desv. Pad. [Vickers]	4		4		3	
Média [Vickers]	54					
Desv. Pad. [Vickers]	4					

Resistência superficial por esclerômetro pendular (Norte) - Após um período de precipitação

	Face Norte					
	Cota 4,5 cm		Cota 44,5 cm		Cota 90,5 cm	
	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	51	53	56	55	51	59
	55	50	52	59	55	57
	52	53	47	59	50	59
	53	58	56	58	60	57
Média [Vickers]	53	54	53	58	54	58
Desv. Pad. [Vickers]	1	3	4	2	4	1
Média [Vickers]	53		55		56	
Desv. Pad. [Vickers]	2		4		4	
Média [Vickers]	55					
Desv. Pad. [Vickers]	3					

Vel. de propagação de ultrassons (método indireto) - Antes de um período de precipitação

			Distância [m]	Medições [μs]	Velocidade [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]
Face Sul	Cota 4,5 cm	Murete 1	0,15	478,20	313,68	305,13	15,25	299,72	28,12
			0,15	521,50	287,63				
			0,30	1044,50	287,22				
			0,30	963,30	311,43				
			0,30	921,10	325,70				
		Murete 2	0,15	454,70	329,89	294,32	35,92		
			0,15	445,80	336,47				
			0,15	630,40	237,94				
			0,30	1061,50	282,62				
			0,30	1053,90	284,66				
	Cota 54,5 cm	Murete 1	0,15	422,00	355,45	305,47	30,48	304,28	25,05
			0,15	460,80	325,52				
			0,15	542,20	276,65				
			0,30	1032,60	290,53				
			0,30	1074,50	279,20				
		Murete 2	0,15	452,00	331,86	303,10	17,99		
			0,15	518,20	289,46				
			0,30	1039,70	288,54				
			0,30	946,90	316,82				
			0,30	1038,80	288,79				
	Cota 110,5 cm	Murete 1	0,15	415,20	361,27	337,52	46,62	309,51	50,23
			0,15	430,00	348,84				
			0,15	369,00	406,50				
			0,30	1046,70	286,62				
			0,30	1054,90	284,39				
		Murete 2	0,15	472,60	317,39	281,49	36,09		
			0,15	452,00	331,86				
			0,30	1135,00	264,32				
			0,30	1224,00	245,10				
			0,30	1205,80	248,80				

Vel. de propagação de ultrassons (método indireto) - Após um período de precipitação

			Distância [m]	Medições [μs]	Velocidade [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]
Face Sul	Cota 4,5 cm	Murete 1	0,15	334,70	448,16	361,70	51,58	374,39	46,85
			0,15	404,30	371,01				
			0,15	405,80	369,64				
			0,30	931,70	321,99				
			0,30	1007,80	297,68				
		Murete 2	0,15	438,10	342,39	387,09	37,52		
			0,15	343,60	436,55				
			0,15	351,50	426,74				
			0,30	831,90	360,62				
			0,30	812,70	369,14				
	Cota 54,5 cm	Murete 1	0,15	395,00	379,75	347,07	38,60	346,82	38,49
			0,15	391,90	382,75				
			0,15	404,50	370,83				
			0,30	957,60	313,28				
			0,30	1039,00	288,74				
		Murete 2	0,15	414,20	362,14	346,58	38,37		
			0,15	393,00	381,68				
			0,15	387,10	387,50				
			0,30	987,20	303,89				
			0,30	1007,80	297,68				
	Cota 110,5 cm	Murete 1	0,15	389,30	385,31	366,62	23,61	372,12	22,37
			0,15	385,20	389,41				
			0,15	391,90	382,75				
			0,30	887,60	337,99				
			0,30	888,50	337,65				
		Murete 2	0,15	374,10	400,96	377,61	19,57		
			0,15	375,60	399,36				
			0,15	401,50	373,60				
			0,30	850,40	352,78				
			0,30	830,20	361,36				

Vel. de propagação de ultrassons (método direto)

		Cota [cm]	Distância [m]	Medições [μs]	Velocidade [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]
Antes de um período de precipitação	Murete 1	4,5	0,14	232,90	601,12	657,91	40,34
		54,5		202,60	691,02		
		110,5		205,40	681,60		
	Murete 2	4,5		247,80	564,97	665,70	79,17
		54,5		207,80	673,72		
		110,5		184,60	758,40		

Vel. de propagação de ultrassons (método direto) (cont.)

		Cota [cm]	Distância [m]	Medições [μs]	Velocidade [m/s]	Média [m/s]	Desv. Pad. [m/s]
Após um período de precipitação	Murete 1	4,5	0,14	244,10	573,54	731,50	115,18
		54,5		180,40	776,05		
		110,5		165,70	844,90		
	Murete 2	4,5		210,30	665,72	768,14	99,35
		54,5		155,10	902,64		
		110,5		190,20	736,07		

Absorção de água por tubos de Karsten - Antes de um período de precipitação

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm²]	Água abs. [kg/m²]	Ca [kg/(m².s ^{0,5})]
Murete 1	1	1,00	0,8	0,2	1,7	1,7
		2,00	1,2	0,3	2,5	1,8
		3,00	1,5	0,3	3,2	1,8
		4,00	1,7	0,4	3,6	1,8
		5,00	2,0	0,4	4,2	1,9
		6,00	2,2	0,5	4,6	1,9
		7,00	2,3	0,5	4,8	1,8
		8,00	2,6	0,6	5,5	1,9
		9,00	2,8	0,6	5,9	2,0
		10,00	3,0	0,6	6,3	2,0
		11,00	3,1	0,7	6,5	2,0
		12,00	3,3	0,7	6,9	2,0
		13,00	3,5	0,7	7,3	2,0
		14,00	3,6	0,8	7,6	2,0
		15,00	3,8	0,8	8,0	2,1
		16,00	4,0	0,8	8,4	2,1
	2	1,00	1,7	0,4	3,6	3,6
		2,00	2,6	0,6	5,5	3,9
		3,00	3,2	0,7	6,7	3,9
		4,00	3,8	0,8	8,0	4,0
		4,20	4,0	0,8	8,4	4,1
	3	1,00	0,9	0,2	1,9	1,9
		2,00	1,6	0,3	3,4	2,4
		3,00	2,1	0,4	4,4	2,5
		4,00	2,5	0,5	5,3	2,6
		5,00	2,9	0,6	6,1	2,7
		6,00	3,3	0,7	6,9	2,8
		7,00	3,6	0,8	7,6	2,9
		8,00	3,9	0,8	8,2	2,9
		8,15	4,0	0,8	8,4	2,9

Absorção de água por tubos de Karsten - Antes de um período de precipitação (cont.)

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm ²]	Água abs. [kg/m ²]	Ca [kg/(m ² .s ^{0,5})]
Murete 2	1	1,00	0,1	0,0	0,2	0,2
		2,00	0,4	0,1	0,8	0,6
		3,00	0,7	0,2	1,5	0,9
		4,00	0,9	0,2	1,9	0,9
		5,00	1,1	0,2	2,3	1,0
		6,00	1,3	0,3	2,7	1,1
		7,00	1,5	0,3	3,2	1,2
		8,00	1,7	0,4	3,6	1,3
		9,00	1,8	0,4	3,8	1,3
		10,00	1,9	0,4	4,0	1,3
		11,00	2,1	0,4	4,4	1,3
		12,00	2,2	0,5	4,6	1,3
		13,00	2,3	0,5	4,8	1,3
		14,00	2,5	0,5	5,3	1,4
		15,00	2,6	0,6	5,5	1,4
		16,00	2,7	0,6	5,7	1,4
		17,00	2,8	0,6	5,9	1,4
		18,00	2,9	0,6	6,1	1,4
		19,00	3,0	0,6	6,3	1,4
		20,00	3,1	0,7	6,5	1,5
	2	1,00	0,4	0,1	0,8	0,8
		2,00	1,0	0,2	2,1	1,5
		3,00	1,4	0,3	2,9	1,7
		4,00	1,7	0,4	3,6	1,8
		5,00	2,1	0,4	4,4	2,0
		6,00	2,3	0,5	4,8	2,0
		7,00	2,6	0,6	5,5	2,1
		8,00	2,9	0,6	6,1	2,2
		9,00	3,2	0,7	6,7	2,2
		10,00	3,4	0,7	7,1	2,3
		11,00	3,7	0,8	7,8	2,3
		12,00	3,9	0,8	8,2	2,4
		12,25	4,0	0,8	8,4	2,4
	3	1,00	0,2	0,0	0,4	0,4
		2,00	0,5	0,1	1,1	0,7
		3,00	0,8	0,2	1,7	1,0
		4,00	1,1	0,2	2,3	1,2
		5,00	1,4	0,3	2,9	1,3
		6,00	1,6	0,3	3,4	1,4
		7,00	1,9	0,4	4,0	1,5
		8,00	2,1	0,4	4,4	1,6
		9,00	2,3	0,5	4,8	1,6
		10,00	2,5	0,5	5,3	1,7
		11,00	2,8	0,6	5,9	1,8
		12,00	3,0	0,6	6,3	1,8

Absorção de água por tubos de Karsten - Antes de um período de precipitação (cont.)

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm ²]	Água abs. [kg/m ²]	Ca [kg/(m ² .s ^{0,5})]
Murete 2	3	13,00	3,2	0,7	6,7	1,9
		14,00	3,4	0,7	7,1	1,9
		15,00	3,6	0,8	7,6	2,0
		16,00	3,8	0,8	8,0	2,0
		16,45	4,0	0,8	8,4	2,1

Absorção de água por tubos de Karsten - Após um período de precipitação

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm ²]	Água abs. [kg/m ²]	Ca [kg/(m ² .s ^{0,5})]
Murete 1	1	1,00	0,3	0,1	0,6	0,6
		2,00	0,5	0,1	1,1	0,7
		3,00	0,7	0,2	1,5	0,9
		4,00	0,9	0,2	1,9	0,9
		5,00	1,1	0,2	2,2	1,0
		6,00	1,2	0,3	2,5	1,0
		7,00	1,3	0,3	2,7	1,0
		8,00	1,5	0,3	3,2	1,1
		9,00	1,6	0,3	3,4	1,1
		10,00	1,7	0,4	3,6	1,1
		11,00	1,9	0,4	4,0	1,2
		12,00	2,0	0,4	4,2	1,2
		13,00	2,1	0,4	4,4	1,2
		14,00	2,2	0,5	4,6	1,2
		15,00	2,3	0,5	4,8	1,3
	2	1,00	0,5	0,1	1,1	1,1
		2,00	0,9	0,2	1,9	1,3
		3,00	1,1	0,2	2,3	1,3
		4,00	1,3	0,3	2,7	1,4
		5,00	1,5	0,3	3,2	1,4
		6,00	1,7	0,4	3,6	1,5
		7,00	1,8	0,4	3,8	1,4
		8,00	1,9	0,4	4,0	1,4
		9,00	2,1	0,4	4,4	1,5
		10,00	2,2	0,5	4,6	1,5
		11,00	2,3	0,5	4,8	1,5
		12,00	2,4	0,5	5,0	1,5
		13,00	2,5	0,5	5,3	1,5
		14,00	2,6	0,6	5,5	1,5
		15,00	2,7	0,6	5,7	1,5
	3	1,00	0,4	0,1	0,8	0,8
		2,00	0,8	0,2	1,7	1,2
		3,00	1,0	0,2	2,1	1,2
		4,00	1,3	0,3	2,7	1,4
		5,00	1,5	0,3	3,2	1,4

Absorção de água por tubos de Karsten - Após um período de precipitação (cont.)

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm²]	Água abs. [kg/m²]	Ca [kg/(m².s ^{0,5})]
Murete 1	3	6,00	1,7	0,4	3,6	1,5
		7,00	1,9	0,4	4,0	1,5
		8,00	2,1	0,4	4,4	1,6
		9,00	2,3	0,5	4,8	1,6
		10,00	2,4	0,5	5,0	1,6
		11,00	2,6	0,6	5,5	1,6
		12,00	2,7	0,6	5,7	1,6
		13,00	2,9	0,6	6,1	1,7
		14,00	3,0	0,6	6,3	1,7
		15,00	3,1	0,7	6,5	1,7
Murete 2	1	1,00	0,2	0,0	0,4	0,4
		2,00	0,4	0,1	0,8	0,6
		3,00	0,5	0,1	1,1	0,6
		4,00	0,6	0,1	1,2	0,6
		5,00	0,6	0,1	1,3	0,6
		6,00	0,7	0,1	1,4	0,6
		7,00	0,7	0,2	1,5	0,6
		8,00	0,8	0,2	1,7	0,6
		9,00	0,8	0,2	1,7	0,6
		10,00	0,8	0,2	1,7	0,5
		11,00	0,9	0,2	1,8	0,5
		12,00	0,9	0,2	1,9	0,6
		13,00	0,9	0,2	1,9	0,5
		14,00	1,0	0,2	2,0	0,5
		15,00	1,0	0,2	2,1	0,5
	2	1,00	0,9	0,2	1,9	1,9
		2,00	1,7	0,4	3,6	2,5
		3,00	2,2	0,5	4,6	2,7
		4,00	2,7	0,6	5,7	2,8
		5,00	3,1	0,7	6,5	2,9
		6,00	3,6	0,8	7,6	3,1
		7,00	3,9	0,8	8,2	3,1
		7,18	4,0	0,8	8,4	3,1
	3	1,00	0,4	0,1	0,8	0,8
		2,00	1,0	0,2	2,1	1,5
		3,00	1,4	0,3	2,9	1,7
		4,00	1,8	0,4	3,8	1,9
		5,00	2,2	0,5	4,6	2,1
		6,00	2,5	0,5	5,3	2,1

Absorção de água por tubos de Karsten - Após um período de precipitação (cont.)

	Tubo	Tempo [min]	Água abs. [ml]	Água abs. [ml/cm ²]	Água abs. [kg/m ²]	Ca [kg/(m ² .s ^{0,5})]
Murete 2	3	7,00	2,8	0,6	5,9	2,2
		8,00	3,1	0,7	6,5	2,3
		9,00	3,4	0,7	7,1	2,4
		10,00	3,7	0,8	7,8	2,5
		11,00	3,9	0,8	8,2	2,5
		11,22	4,0	0,8	8,4	2,5

Absorção de água por tubos de Karsten aos 4 minutos - Antes de um período de precipitação

	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	Tubo 1	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 3
Água abs. [ml/cm²]	0,4	0,2	0,8	0,4	0,5	0,2
Média [ml/cm²]	0,3		0,6		0,4	
Média [ml/cm²]	0,4					
Desv. Pad. [ml/cm²]	0,2					
C _a [kg/(m².t ^{0,5})]	1,8	0,9	4,0	1,8	2,6	1,2
Média [kg/(m².t ^{0,5})]	2,1					
Desv. Pad. [kg/(m².t ^{0,5})]	1,0					

Absorção de água por tubos de Karsten aos 4 minutos - Após um período de precipitação

	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2	Murete 1	Murete 2
	Tubo 1	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 3
Água abs. [ml/cm²]	0,2	0,1	0,3	0,6	0,3	0,4
Média [ml/cm²]	0,2		0,4		0,3	
Média [ml/cm²]	0,3					
Desv. Pad. [ml/cm²]	0,2					
C _a [kg/(m².t ^{0,5})]	0,9	0,6	1,4	2,8	1,4	1,9
Média [kg/(m².t ^{0,5})]	1,5					
Desv. Pad. [kg/(m².t ^{0,5})]	0,7					