



**Nuno Duarte Boteta Gomes**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

## **Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias ecoeficientes**

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

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Prof. Doutora M<sup>a</sup>. Idália da Silva Gomes

Vogal: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Maio de 2015**



‘Copyright’ Nuno Duarte Boteta Gomes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficas, 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.



A ti avô *Lila*



# AGRADECIMENTOS

Chega ao fim mais uma etapa da minha vida, foi uma caminhada difícil, mas felizmente fui sempre bem acompanhado e bastante incentivado por diversas pessoas que se cruzaram na minha vida, e às quais tenho de agradecer:

Em primeiro lugar, tenho de agradecer à Professora Doutora Paulina Faria, pela possibilidade que me deu de trabalhar sobre um tema que eu sempre tive um carinho especial devido às minhas origens alentejanas, pela constante ajuda e ensinamentos transmitidos, palavras amigas nas horas mais difíceis e por toda a paciência que teve para comigo.

Ao engenheiro Vitor Silva pelo constante acompanhamento que me prestou durante todo o desenvolvimento da campanha experimental pelo amigo que se mostrou.

Aos meus colegas David, Hugo, Rafa, Miguel, João Simões, Carla, Diana e outros tantos que não consigo mencionar, pela sua companhia e ajuda durante todo o curso, e em todos os momentos de divertimento que ficam para sempre gravados na nossa memória.

À Teresa que apareceu na minha vida de uma forma diferente nestes últimos meses, tendo sido essencial neste longo caminho, por todo o apoio, incentivo e motivação dada. Havemos de ter um futuro risonho.

A todos os meus amigos das Alcáçovas, que estão sempre presentes na minha vida e nos tornámos uma enorme família, obrigado Irmãos e Irmãs. Não querendo fazer distinções, mas tenho de referir os amigos de 89, o Piteira, a Beatriz, a Cristina, a Sofia, o Pedro e os seus respectivos, que nunca nos separámos mas demonstramos uma enorme amizade.

Às oficinas do Convento, por me terem disponibilizado o material para esta dissertação e a possibilidade de estar agora a usufruir de um estágio profissional, que tem sido gratificante trabalhar num projecto tão abrangente, inovador, e que realiza bastante a nível pessoal e profissional. Tenho de destacar o Nuno Grenha e a Tânia por todo o apoio e incentivo dado, a constante troca de conhecimento que temos feito, e pelo projecto futuro que estamos a desenvolver. Obrigado por me terem acolhido tão bem.

À Solbloc empresa que disponibilizou material para ser estudado nesta dissertação, e à qual faz parte o Arquitecto Miguel Rocha, pelo conhecimento transmitido e todo o incentivo prestado.

Ao telheiro do Gaio pelo material disponibilizado para ser estudado nesta dissertação.

Por ultimo mas não menos importante queria agradecer à minha família por todo o apoio prestado tendo-me sempre ajudado em todos os momentos menos bons e dado uma palavra de conforto. Obrigado Pai, obrigado Mãe, obrigado Mana.



# RESUMO

A terra foi utilizada como material de construção desde os primórdios das civilizações, tendo caído em desuso em alguns países mais desenvolvidos durante o século XX, com o aparecimento do betão. Nesse período de tempo no mundo Ocidental perdeu-se alguma passagem de *saber* entre gerações, saber esse que já vinha sendo transmitido desde há muito. No entanto, a partir dos anos 80 do século XX, e particularmente no século XXI, uma renovada atenção tem sido dada à terra como material de construção. A crescente procura de conhecimento cientificamente fundamentado acerca da construção em terra justifica-se devido à eco-eficiência que confere, nomeadamente através de baixos consumos energéticos inerentes à extracção, preparação, transporte e aplicação na construção, e ao bom comportamento higrotérmico e acústico resultante. Assim, tem surgido a necessidade de caracterizar as construções com terra com vista a poder intervir de forma correcta nas existentes e poder otimizar novas construções.

Nesta dissertação pretende-se contribuir para a caracterização do comportamento de blocos de terra para a execução de alvenarias. Os blocos em análise resultam de três tipos diferentes de fabrico: blocos de terra comprimidos (BTC), blocos de terra moldados (adobes) e blocos de terra cozidos (tijolo maciço).

Para a caracterização foram estabelecidos procedimentos de ensaio, em vários casos não definidos na bibliografia existente, e foram avaliados parâmetros mecânicos, físicos e de durabilidade para caracterizar os blocos em análise. Além dos ensaios realizados aos blocos alvo de estudo, de que são exemplo as resistências à compressão e flexão, a resistência à abrasão, a absorção de água por capilaridade, entre outros, na extensa campanha experimental realizada, foram ainda caracterizados os solos utilizados no fabrico dos blocos e possíveis argamassas de assentamento.

Um dos tipos de blocos estudado no presente trabalho, foi aplicado na construção de uma estrutura em Montemor-o-Novo, a que foi denominada Abancódomo, tendo-se descrito a solução construtiva e apresentadas anomalias detectadas após um certo período de tempo.

Como foram estudados vários tipos de blocos com características muito diferentes, não é possível fazer uma comparação directa entre eles. Em qualquer comparação entre as propriedades dos blocos, deve ter-se sempre bem presente qual a diferença de fabrico dos mesmos.

Analisando os resultados obtidos considera-se que os blocos de terra comprimida, apesar de apresentarem valores de resistência inferiores aos dos blocos cozidos, possam ter características satisfatórias, tendo em conta que não carecem de cozedura, e conseqüente consumo energético, para a sua produção.

**Termos chave:** Bloco de terra, alvenaria de terra, caracterização laboratorial.



# ABSTRACT

Earth has been used as a building material in the World since early civilizations, but during the 20th century this technique was almost completely abandoned in the most of developed countries, with the appearing of concrete. In this period of time there was almost no passage of knowhow between generations. Since the 80's and particularly in the 21st century the interest in earth as building material has grown. There has been a growing demand of knowledge about earth construction because of their eco-efficiency. In fact this type of construction has low energy consume and contributes for a good thermo-hygrometric and acoustic behavior of buildings. There is the need to characterize the earth buildings in order to be able to act properly in the ones that are already built and to optimize new constructions.

In this dissertation the behavior of three types of earth masonry blocks is characterized: compressed earth blocks, adobe blocks and massive fired blocks. Test procedures were optimized and mechanical, physical and durability parameters were studied in order to analyze the properties of the blocks. Examples of the tests performed are: flexural and compressive strength, resistance to abrasion, water absorption under low pressure and by capillarity, among other tests, in the extensive experimental campaign developed. The soils used in the blocks production and some possibilities of mortars to the settlement of blocks were also characterized.

One of the types of blocks analyzed in this work, was applied in the construction of a structure in Montemor-o-Novo, named by Abancódromo. It was described the constructive solution and the anomalies detected after a period of time were presented.

As the type of blocks studied have characteristics very different, it was not possible to do a direct comparison between them. In any comparison between the properties of blocks, it should be present the differences of production of them.

Analyzing the results it is considered that the compressed earth blocks, despite having lower resistance values of the ceramic blocks may have satisfactory characteristics, taking into account that does not require firing, and the consequent energy consumption, for its production.

**Keywords:** Earth block, masonry, laboratory characterization.



# ÍNDICE

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivações .....	1
1.2 Objectivos e metodologia .....	1
1.3 Estrutura e organização do texto .....	1
<b>2. Construção com terra .....</b>	<b>3</b>
2.1 A terra como material de construção .....	3
2.2 Conceito e origens .....	4
2.3 Regulamentação existente .....	5
2.4 Técnicas construtivas.....	9
2.4.1. <i>Blocos de terra comprimida – BTC</i> .....	10
2.4.2. <i>Blocos de terra crua (Adobe)</i> .....	10
2.4.3. <i>Blocos de terra cozida (Tijolo maciço)</i> .....	11
2.5 Materiais .....	13
2.5.1. <i>Solo</i> .....	13
2.5.2. <i>Ligantes e estabilizantes</i> .....	16
<b>3. Desenvolvimento da Campanha experimental e caracterização dos materiais .....</b>	<b>21</b>
3.1 Descrição geral da campanha experimental .....	21
3.2 Caracterização das matérias-primas.....	24
3.2.1. <i>Análise granulométrica</i> .....	24
3.2.2. <i>Limites de Atterberg</i> .....	27
3.2.3. <i>Classificação Unificada de solos</i> .....	30
3.2.4. <i>Ensaio Proctor</i> .....	30
<b>4. Ensaio de caracterização dos blocos e resultados .....</b>	<b>33</b>
4.1 Descrição geral .....	33
4.2 Condutibilidade térmica ( $\lambda$ ).....	34
4.3 Velocidade de propagação de ultra-sons .....	36
4.4 Absorção de água sob baixa pressão (tubos de <i>Karsten</i> ) .....	39
4.4.1. <i>Ensaio preliminar</i> .....	39
4.4.2. <i>Ensaio escolhido</i> .....	42
4.5 Absorção de água por capilaridade .....	44
4.6 Resistência à Compressão .....	47
4.6.1. <i>Ensaio preliminar</i> .....	48
4.6.2. <i>Em estado seco</i> .....	51
4.6.3. <i>Em estado húmido</i> .....	52
4.7 Estabilidade dos Blocos Após Envelhecimento acelerado.....	54
4.8 Erosão a seco .....	57

4.9	Abrasão húmida .....	59
4.10	Drop test .....	61
4.11	Expansibilidade unidireccional .....	63
4.12	Discussão global dos resultados .....	65
<b>5.</b>	<b>Caso práctico – Construção do Abancódromo .....</b>	<b>69</b>
5.1	Descrição geral .....	69
5.2	Análise crítica.....	71
<b>6.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>75</b>
6.1	Considerações finais .....	75
6.2	Propostas para trabalhos futuros .....	76
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>77</b>
	<b>Anexo – Dados dos ensaios.....</b>	<b>83</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Construção com terra a nível mundial.....	5
Figura 2.2 – Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: .....	6
Figura 2.3 - Diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes famílias de sistemas de construção antigos e modernos .....	9
Figura 2.4 – Amostras de matérias-primas cozidas a várias temperaturas.....	12
Figura 3.1 – Faces superiores dos blocos .....	22
Figura 3.2 – Faces inferiores dos blocos .....	23
Figura 3.3 – Curva granulométrica do solo SB, SM, RCD e da mistura dos dois ultimos .....	26
Figura 3.4 – Fotografia do resultado da peneiração a seco.....	26
Figura 3.5 – Ensaio Proctor para Solo SB .....	32
Figura 3.6 – Ensaio Proctor para Solo SM.....	32
Figura 4.1 – Organograma relativo aos ensaios realizados aos blocos; .....	33
Figura 4.2 – Pontos de contacto nas medições da condutibilidade térmica .....	34
Figura 4.3 – Medição de um valor de condutibilidade térmica.....	35
Figura 4.4 – Condutibilidade térmica dos blocos em estudo (valor médio e desvio padrão).....	35
Figura 4.5 – Posicionamento dos pontos em análise .....	37
Figura 4.6 – Medição de valor dos ultra-sons e aparelho de leitura.....	37
Figura 4.7 – Valores de velocidade de propagação de ultra-sons .....	38
Figura 4.8 – Tubos de Karsten .....	39
Figura 4.9 – Bloco E10 a) antes do ensaio e b) depois do ensaio .....	40
Figura 4.10 – Quantidade de água absorvida e coeficiente de absorção de água em função do tempo em minutos.....	41
Figura 4.11 – Quantidade de água absorvida e coeficiente de absorção de água em função da raiz do tempo.....	41
Figura 4.12 – Tempo entre medições e quantidade de água adicionada.....	42
Figura 4.13 – Ensaio a 3 blocos do lote B .....	43
Figura 4.14 – Resultados do ensaio de tubos de karsten.....	43
Figura 4.15 – Ensaio preliminar ao bloco do lote B.....	44
Figura 4.16 – Blocos durante o ensaio de capilaridade.....	45
Figura 4.17 – Coeficientes de capilaridade dos blocos .....	46
Figura 4.18 – Valores assintóticos dos blocos .....	47
Figura 4.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade .....	47

Figura 4.20 – Valores de resistência à compressão dos provetes em estudo, bem como indicação dos valores estimados de resistência à compressão dos blocos E e B. ....	51
Figura 4.21 – Procedimentos de preparação dos blocos .....	52
Figura 4.22 – Resultados do ensaio de compressão .....	53
Figura 4.23 – Gráfico de variação de massa em função do tempo.....	55
Figura 4.24 – Gráfico de variação unidimensional em função do tempo.....	55
Figura 4.25 – À esquerda pode-se ver o lote B durante o período de imersão em água; à direita está o lote E após os 6 ciclos do ensaio; .....	56
Figura 4.26 – Ensaio de envelhecimento acelerado.....	56
Figura 4.27 – Escova que se encontra acoplada na superfície deslizante do mecanismo .....	57
Figura 4.28 – Máquina de erosão a seco com destaque dos inversores .....	57
Figura 4.29 –Bloco do lote E após o ensaio.....	58
Figura 4.30 – Resultados do ensaio de erosão a seco.....	59
Figura 4.31 – Equipamento do ensaio de erosão húmida .....	60
Figura 4.32 – Construção do equipamento para o ensaio de drop test.....	61
Figura 4.33 –Preparação do ensaio drop test .....	62
Figura 4.34 – Bloco no ensaio.....	63
Figura 4.35 – Pormenor do encaixe no deflectómetro.....	64
Figura 4.36 – Expansão unidireccional dos blocos E e B.....	65
Figura 5.1 – Construção da alvenaria.....	69
Figura 5.2 – Alvenaria do Abancódromo.....	70
Figura 5.3 – Abancódromo por cair .....	70
Figura 5.4 - Abancódromo.....	71
Figura 5.5 – Destaque e fissuração de reboco.....	71
Figura 5.6 – Situação originada por vandalização .....	72
Figura 5.7 Fendilhação do reboco .....	72
Figura 5.8 – Destaque, Fissuração e Vandalização .....	72
Figura 5.9 – Faixa húmida junto do embasamento e com realce de fendilhação.....	73
Figura 5.10 – Destaque total do reboco.....	73

# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra .....	7
Quadro 2.2 - Vantagens e desvantagens do adobe .....	10
Quadro 2.3 – Fenómenos ocorridos durante a cozedura de argilas .....	12
Quadro 2.4 – Massa volúmica seca após compactação .....	14
Quadro 2.5 – Limites de consistência para solos utilizados na construção.....	14
Quadro 2.6 – Classificação da plasticidade de um solo .....	14
Quadro 2.7 – Índice de actividade de argilas .....	15
Quadro 2.8 – Classificação do solo segundo o seu diametro .....	15
Quadro 3.1 – Quadro resumo dos lotes de blocos em estudo.....	22
Quadro 3.2 – Quadro resumo dos solos utilizados na produção dos blocos.....	23
Quadro 3.3 – Resumo das percentagens de cada constituinte do solo .....	26
Quadro 3.4 – Determinação do limite de liquidez para o solo SB.....	28
Quadro 3.5 – Determinação do limite de liquidez para o solo SM .....	28
Quadro 3.6 – Determinação do limite de plasticidade para o solo SB .....	29
Quadro 3.7 – Determinação do limite de plasticidade para o solo SM.....	29
Quadro 4.1 – Valores médios e desvios-padrão da condutibilidade térmica.....	35
Quadro 4.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons.....	38
Quadro 4.3– Quadro resumo dos coeficientes de absorção de água .....	42
Quadro 4.5 – Resultados do ensaio de tubos de karsten.....	43
Quadro 4.6 – Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico .....	46
Quadro 4.7 – Volumes dos constituintes das argamassas .....	49
Quadro 4.8 – Quantidades de material utilizado nas segundas argamassas.....	49
Quadro 4.9 – Quadro resumo dos valores de compressão realizados aos provetes.....	50
Quadro 4.10 – Valores estimados de resistência à compressão através do ensaio de flexão.....	51
Quadro 4.11 – Resultados do ensaio de compressão .....	53
Quadro 4.12 – Resultados do ensaio de erosão a seco.....	59
Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de erosão humida.....	61

Quadro 4.14 – Resultados do ensaio de drop test .....	63
Quadro 4.15 – Expansão unidireccional dos blocos E e B .....	64
Quadro 4.16 – Quadro resumo de resultados.....	66

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

## Siglas

- ASTM – American Society for Testing and Materials
- AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación
- CEN – Comité Européen de Normalisation
- CRATerre – Centre International de la Construction en Terra
- DEC-FCT – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Engenharia
- EN – European Norm
- FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- IPQ – Instituto Português da Qualidade
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- NZS – New Zealand Standards
- NP – Norma Portuguesa
- TEC – Telheiro da Encosta do Castelo das Oficinas do Convento

## Materiais

- B – Bloco de terra comprimida proveniente de Badajoz (Espanha)
- BTC – Bloco de terra comprimida
- C – Tijolo maciço cru proveniente de Évora
- CL – Cal aérea
- E – Bloco de terra comprimida proveniente de Montemor-o-Novo
- HL – Cal hidráulica HL5 produzida pela Secil
- NHL – Cal hidráulica natural NHL3.5 produzida pela Secil
- SB – Solo de Badajoz
- SM – Solo de Montemor-o-Novo
- RCD – Resíduo de construção e demolição
- TB – Tijolo maciço cozido proveniente de Montemor-o-Novo
- TC – Tijolo maciço cru proveniente de Montemor-o-Novo

## Ensaios realizados e parâmetros analisados

- CC – Coeficiente de capilaridade

HR – Humidade relativa

Rc – Resistência à compressão

Rt – Resistência à tracção por flexão

VA – Valor assintótico da curva de capilaridade

$\Delta M$  – Variação de massa

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 Enquadramento e motivações**

A construção em terra tem sido usada desde há milhares de anos por várias civilizações por todo o mundo, sendo que muitas técnicas diferentes foram desenvolvidas consoante a localização geográfica e condições meteorológicas existentes em cada local. Estima-se que actualmente cerca de trinta por cento da população mundial vive em casas que usam a terra como material de construção.

Nos países desenvolvidos, com o aparecimento do betão armado e a modernização das técnicas construtivas, durante o século XX a construção com recurso a terra foi caindo em desuso, conduzindo à perda do conhecimento das técnicas. Contrariando a tendência de desaparecimento, este material construtivo ressurgiu com interesse renovado a partir da década de 80 do mesmo século.

A construção em terra apresenta grandes vantagens em termos de conforto higrotérmico e acústico. Além disso, a sustentabilidade ambiental que lhe está inerente é inquestionável visto ser um recurso que abunda em quantidade no próprio local de construção ou arredores, evitando desta forma gastos energéticos significativos com transportes e com preparação da matéria-prima.

## **1.2 Objectivos e metodologia**

Esta dissertação tem como objectivo avaliar as características de blocos de terra resultantes de três tipos de fabrico distintos, visando caracterizar o seu comportamento para a execução de alvenarias. Para tal, foram definidos procedimentos de ensaios que, por vezes dada a inexistência de instruções (de ensaios normalizados) para ensaio aos blocos, tiveram de ser adaptados das normas ou mesmo estabelecidos especificamente para esse fim.

Desta forma, pretende-se com este estudo contribuir para o aumento do conhecimento relativo aos blocos e às suas características, nomeadamente através do estabelecimento de procedimentos de ensaio fáceis de implementar, de modo a permitir o seu uso mais corrente na constituição de paredes de alvenaria.

## **1.3 Estrutura e organização do texto**

A dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema, a definição dos objectivos e a indicação da metodologia seguida, assim como a estrutura de texto apresentada nesta dissertação.

No segundo capítulo é feita uma revisão do estado dos conhecimentos relativos à construção com terra, em que decreve a história, conceito e origem. Descreve-se a regulamentação existente, o

seu âmbito de aplicação e as técnicas em que se basearam esta dissertação. São também revistos os materiais utilizados, as classificações de solos e vários tipos de ligantes aplicáveis à construção com terra.

No terceiro capítulo são apresentados os tipos de blocos analisados na campanha experimental, bem como os tipos de solos utilizados, e a sua caracterização, e os processos de fabrico dos blocos.

No quarto capítulo é apresentada a campanha experimental para caracterização dos blocos. Para cada ensaio é descrito o procedimento preliminar e seus resultados, caso seja aplicável. Os ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de aferir a aplicabilidade dos ensaios à análise de blocos de terra. São também apresentados os procedimentos dos ensaios selecionados e os respetivos resultados. Por fim, os resultados dos ensaios serão comparados com o preconizado na regulamentação existente, caso exista regulamentação que refira o ensaio.

No quinto capítulo é apresentado um caso prático, o Abancódromo, que foi construído com blocos de terra comprimida, do lote E analisado no presente estudo. São também expostos os problemas registados dois anos após a construção.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo, referindo o cruzamento dos diversos resultados obtidos. São também sugeridos alguns desenvolvimentos futuros para o trabalho.

## 2. CONSTRUÇÃO COM TERRA

Neste capítulo procede-se a uma análise do estado dos conhecimentos actual na área da construção com terra e dando mais atenção para a caracterização de terras e de blocos realizados com terras.

### 2.1 A terra como material de construção

Desde há milhares de anos que a terra é utilizada como material construtivo em várias civilizações e por todo o mundo. Muitas técnicas diferentes foram sendo desenvolvidas consoante a localização geográfica, as disponibilidades de materiais, equipamentos e mão-de-obra, e as condições meteorológicas existentes em cada local. Estima-se que actualmente pelo menos um terço da população mundial viva em casas que usam a terra como material de construção (Minke, 2000).

A terra é uma matéria-prima presente em abundância na envolvente do local de construção e que está disponível para ser utilizada como material de construção. A sua utilização evita consumos energéticos elevados de produção, emissões de carbono e gastos com transporte significativos, pelo que a construção em terra poderá ser classificada como ambientalmente sustentável. Por outro lado, as construções com terra apresentam ainda grandes vantagens no que respeita a conforto higrotérmico e acústico. Com efeito no interior das construções com terra verificam-se geralmente níveis de humidade relativa equilibrados e benéficos à saúde humana (o que se deve à capacidade higroscópica da terra) associados a elevados níveis de conforto acústico (Faria et al., 2014).

A construção em terra foi caindo em desuso a partir do início do século XX, nos países mais desenvolvidos, com o aparecimento de técnicas e materiais mais modernos. Assim, o saber, que era transmitido entre gerações, foi também desaparecendo (Gomes et al., 2014). A construção em terra foi-se mantendo nos países em desenvolvimento, geralmente associado à escassez de recursos económicos e financeiros das populações (Gomes, 2013).

No entanto, com o fim do século XX, com os problemas energéticos, ambientais, ecológicos e económicos que afetaram os países desenvolvidos, houve uma crescente sensibilização para as vantagens competitivas da construção em terra em relação à construção corrente, pelo que surgiu uma renovada atenção sobre a terra como material construtivo e as técnicas utilizadas tradicionalmente (Gomes et al., 2014).

Têm sido identificados, a nível nacional e internacional, diversos problemas no desenvolvimento da construção em terra, principalmente associados à falta de mão-de-obra qualificada, consequência da tendência de desaparecimento das técnicas, ausência de formação de técnicos de construção em terra e ainda por este tipo de construção aparecer associada a desconforto e a pessoas com baixos recursos económicos para possuir uma habitação construída com os materiais correntes (Gomes, 2013).

Verifica-se actualmente uma progressão no sentido de compreender os métodos construtivos, analisar as propriedades dos materiais e os factores que levam à sua degradação. Com estes

estudos é possível otimizar a construção nova e dar a melhor resposta ao nível de intervenções de reabilitação e conservação das construções já existentes (Gomes, 2013).

Em Portugal, as condições climáticas são propícias à construção em terra e muitas das construções que constituem o património edificado Português são de terra. No entanto, em Portugal a construção em terra tem progredido muito lentamente, não existindo ainda normalização para este tipo de construção. Apesar disso, e como referido anteriormente, há investigação no sentido de conhecer técnicas e caracterizar materiais e já existem mesmo algumas construções recentes em terra, essencialmente no Alentejo e Algarve (Torgal et al., 2009).

## 2.2 Conceito e origens

Desde a antiguidade que a terra é utilizada como material de construção devido à sua abundância e fácil obtenção (Souza, 2006). Não é consensual a data do início de construção em terra, existindo diversos autores que apontam idades diferentes para as primeiras construções. No entanto, segundo Torgal et al. (2009) admite-se que a construção em terra tenha tido início com o início das primeiras sociedades agrícolas num período entre 12.000 a 7.000 a.C..

A construção em terra foi sempre a técnica construtiva mais utilizada, verificando-se no entanto que as técnicas, os materiais e os conhecimentos utilizados foram sendo modificados em função do passar do tempo e das diferentes culturas e lugares (Gomes, 2013). Existem ainda na actualidade muitas construções com alguns milhares de anos, construídas em lugares muito diferentes e utilizando técnicas distintas. São disso exemplos: o Templo de Ramsés II, no Egipto, construído em adobe há 3.200 anos; a Grande Muralha da China, na China, cuja construção em taipa foi iniciada há cerca de 3.000 anos; a cidade de Shibam, no Líbano, composta por edifícios com 5 a 11 andares com paredes exteriores em adobe. Apesar da cidade ter tido origem no século III, a maioria das construções ainda preservadas e habitadas datam do século XVI. Além dos referidos exemplos há que ter noção que a terra é considerada um material construtivo universal e que existem construções em terra dispersas por várias regiões do mundo (Torgal et al., 2009). A Figura 2.1 representa a distribuição da construção em terra a nível mundial.

A construção em terra teve início na Península Ibérica por influência de povos como os Fenícios, os Cartagineses, os Romanos e os Muçulmanos. Em Portugal, existem ainda muitos exemplares de construções em terra, um pouco por todo o território nacional, com diferentes técnicas de construção. Essas técnicas distribuem-se por regiões, verificando-se a existência de construções em taipa, sobretudo abaixo do Tejo e no Algarve; a construção em adobe estende-se pelos distritos de Setúbal, Évora, Portalegre, Santarém, Leiria, Coimbra e Aveiro; as construções em tabique verificam-se essencialmente nas Beiras (Alta e Baixa), Trás-os-Montes e Douro e Minho (Torgal et al., 2009). As distribuições geográficas dos vários tipos de técnicas de construção em terra em Portugal são apresentadas na Figura 2.2.



Figura 2.1 – Construção com terra a nível mundial (extraído de Gomes, 2013)

### 2.3 Regulamentação existente

A construção em terra em Portugal tem sido uma realidade desde há vários séculos, sendo o conhecimento transmitido de uma geração para a geração seguinte sem que exista qualquer regulamentação ou norma.

Sendo assim aos projectistas portugueses não resta outra alternativa senão utilizar as alvenarias de terra apenas com função de preenchimento, recorrendo a uma estrutura corrente de betão armado de forma a cumprir os requisitos de segurança às acções sísmicas.

No entanto são já vários países que possuem regulamentação no âmbito da construção em terra. Schroeder et al. (2012) identifica pelo menos 33 documentos, entre normas e documentos normativos, relativas a 19 países e regiões. Cid et al. (2011) também apresenta documentos normativos referentes à construção em terra."

No Brasil foi criada normalização para a construção em terra, nomeadamente a norma NBR 8491 (ABR, 1984) – "Tijolo de solo-cimento", que define parâmetros para a produção de tijolos maciços de solo-cimento destinados à execução de alvenarias, e a NBR 8492 (ABR, 1984) – "Tijolo maciço de solo-cimento – determinação da resistência à compressão e da absorção d'água". Na segunda norma indicada é definida uma metodologia de ensaio dos blocos de terra comprimida (BTC) à compressão e à absorção de água.

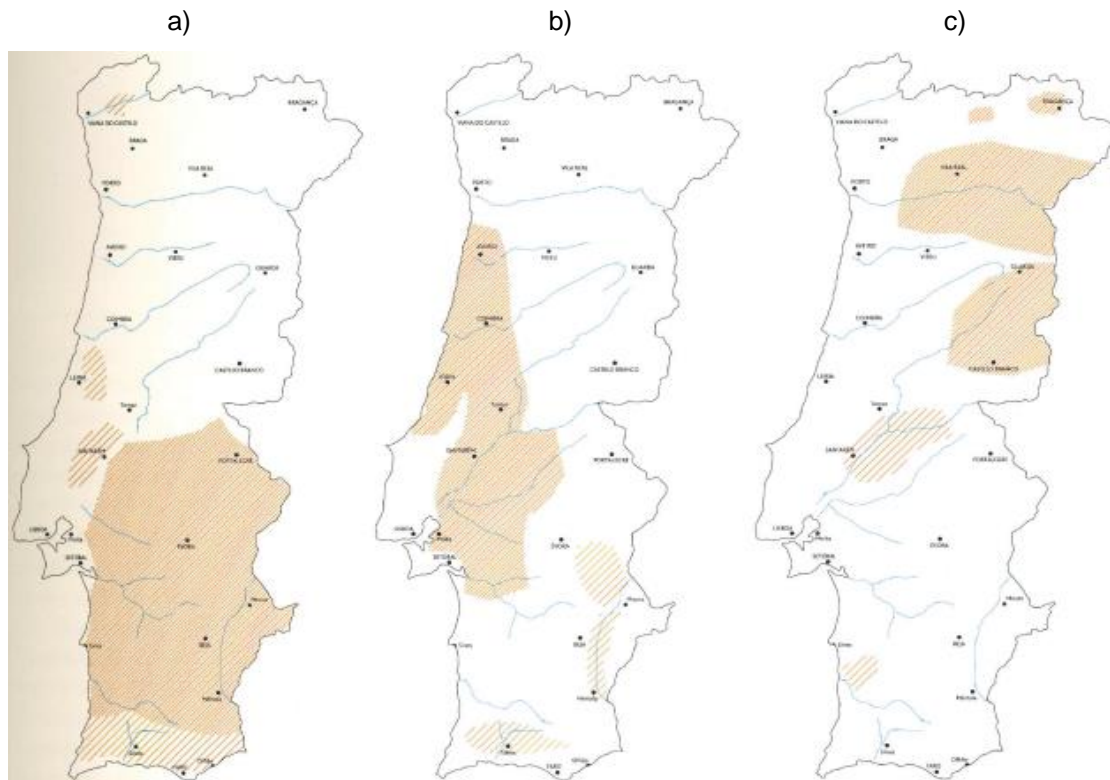


Figura 2.2 – Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (imagem extraída de Torgal et al., 2009)

Na Alemanha as primeiras regras técnicas sobre a construção em terra (Earth Building Code) datam de 1944, tendo sido consideradas obsoletas em 1971. Foi nessa altura publicado o documento normativo para a construção em terra “*Lehmbau Regeln*”, que constitui ainda hoje um importante regulamento que serve de base a vários outros países. Em 2011 surgiram as versões *draft* de três normas DIN (DIN 18945 – Blocos de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio; DIN 18946 – Argamassas de assentamento de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio; DIN 18947 – Rebocos de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio) (Schroeder *et al.* 2012), que em 2013 passaram a definitivas.

A Austrália também foi um dos primeiros países, a par da Alemanha, a ter regulamentação específica sobre a construção em terra. Em 1952 foi publicado o “Bulletin 5” pela Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Este documento apresentou, pela primeira vez, um teste de erosão acelerada utilizando água pulverizada. Este regulamento era utilizado, até há relativamente pouco tempo, para projecto de construção e aplicava-se às técnicas de BTC, adobes e taipa. Contudo era necessário um documento mais completo e actual. Assim, no ano de 2002, foi publicado o livro “*Australian earth building handbook*” (2002), que veio actualizar a regulamentação neste país.

Em Espanha, no ano de 1992, o Ministério dos Transportes e Obras Públicas publicou um documento de referência para o projecto e construção de estruturas com terra, “*Bases para el Diseño y Construcion com Tapial*”, sendo o principal foco deste documento a taipa. Mais recentemente foi publicada a norma Espanhola UNE 41410 (2008), pela AENOR (*Asociación Española de*

*Normalización y certificación*), com o título “*Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*”. Esta norma foi definida apenas para BTC e é essencial para o seu estudo e certificação.

Nos Estados Unidos da América, apenas o estado do Novo México tem regulamentação estadual, desde 1991, para construção com taipa, adobe e BTC, designada “New Mexico Earthen Building Materials Code” (2003). Este documento contém indicações para selecções de solos, seu teor de humidade, estabelece ainda requisitos para as cofragens a utilizar e seus métodos de construção.

Na Nova Zelândia os regulamentos utilizados para a construção com terra são dos mais completos existentes actualmente ao nível global. Existem três regulamentos distintos, nomeadamente:

- NZS 4297:1998 – Engineering Design and Earth Buildings – Define critérios de desempenho em termos de durabilidade, resistência, retracção, isolamento térmico e resistência ao fogo;

- NZS 4298:1998 – Materials and Workmanship for Earth Buildings – Especifica exigências em termos de materiais e de mão-de-obra;

- NZS 4299:1998 – Earth Buildings not Requiring Specific Design – Aplicável para edifícios com menos de 600m<sup>2</sup> (ou 300m<sup>2</sup> por piso) e estabelece soluções construtivas para as paredes, fundações, lintéis.

Por fim, sem qualquer associação a um país, a RILEM trata-se de uma associação criada em 1947 por directores de vários laboratórios mundiais. Na RILEM é apresentado um procedimento técnico relativo à forma de ensaiar BTC à compressão, denominando-se TC 164-EBM:1997 - “Mécânica de la construction en terre – Mode opératoire pour la réalisation d’essais de résistance sur blocs de terre comprime”.

Para compilar todas as normas numa tabela de resumo (Quadro 2.1 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra (adaptado e actualizado) a partir de Delgado (2007).

Quadro 2.1 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra (adaptado e actualizado) a partir de Delgado (2007)

Grupo	País	Documento	Técnicas	Ano	Conteúdo
Normas oficiais e regulamentação	EUA	NMAC 14.7.4	A, BTC, T	2000	Pequenas recomendações. Unidades de construção devem ser testadas.
	França	XP P 13-901	BTC	2001	Ábacos de plasticidade e granulometria. Avaliação do solo
	Nova Zelândia	NZS 4297	A, BTC, T	1998	Recomendações não quantitativas acerca dos solos que não devem ser usados. Teste de seco/molhado necessário.
		NZS 4298		1998	-
NZS 4299		1998		-	

Quadro 2.1 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra (adaptado e actualizado) a partir de Delgado (2007)

Grupo	País	Documento	Técnicas	Ano	Conteúdo
	Peru	NTE E 080	A	2000	Pequenas recomendações sobre a granulometria
	Região de África	ARSO	BTC	1996	Ábacos de plasticidade e granulometria. Enumera e classifica os testes ao solo, mas não explica procedimentos.
	Zimbábue	SAZS 724	T	2001	Recomendações para a granulometria, sais matéria orgânica e teste da fita
Documentos normativos	Alemanha	Lehmbau Regeln	A, BTC, T	1999	Conjunto de recomendações técnicas para a construção em terra.
	Austrália	HB 195	A, BTC, T	2002	Enumeração dos testes empíricos e laboratoriais, com procedimentos definidos para alguns ensaios. Recomendações de granulometria para cada técnica.
		Bulletin 5		1992	Recomendações gerais sobre a granulometria Observações do desempenho do património edificado.
		EBAA		2001	Recomendações não quantitativas acerca dos solos a não usar
	Espanha	MOPT	A, BTC, T	1992	Adequabilidade acerca de usar os testes sensoriais para tomar decisões. Testes laboratoriais aconselháveis para escolha da granulometria.
		UNE 41410	BTC	2008	Indica definições e procedimentos de ensaio para realizar ensaios laboratoriais
	CYTED	CYTED	A, BTC, T	1995	Não define uma aproximação directa à selecção dos solos, recomendações dependem da resistência a seco dos ensaios
Documentos técnicos	Houben and Guillaud	-	A, BTC, T	1994	Propriedades essenciais: granulometria, plasticidade, compactação e coesão. Testes de identificação preliminares e laboratoriais são explicados. Ábacos de granulometria, plasticidade compactação
	Rigassi V	-	BTC	1995	Granulometria, plasticidade e compatibilidade, identificação dos solos laboratorialmente e sensorialmente.
	Mc. Henry PG	-	A, T	1984	Escolha de solos que tem boa performance em construções existentes
	Smith and Austin	-	A, BTC, T	1996	Identificação e selecção de solos não são dadas muita importância. Testar provete é a melhor solução
	OIA	-	A, BTC, T	1970	Adequabilidade acerca de usar os testes sensoriais para tomar decisões
	Spence and Cook	-	A, BTC, T	1983	Conhecer essencialmente as propriedades: tamanho das partículas, limites de Atterberg, compactação e classificação de solos, apesar de não darem as recomendações.

## 2.4 Técnicas construtivas

Neste capítulo são apresentadas com maior foco as técnicas construtivas que foram alvo de estudo no presente trabalho experimental, embora existam mais técnicas construtivas em terra.

Na Figura 2.3 é apresentado o diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes famílias de sistemas de construção antigos e modernos, que utilizam terra como matéria-prima.

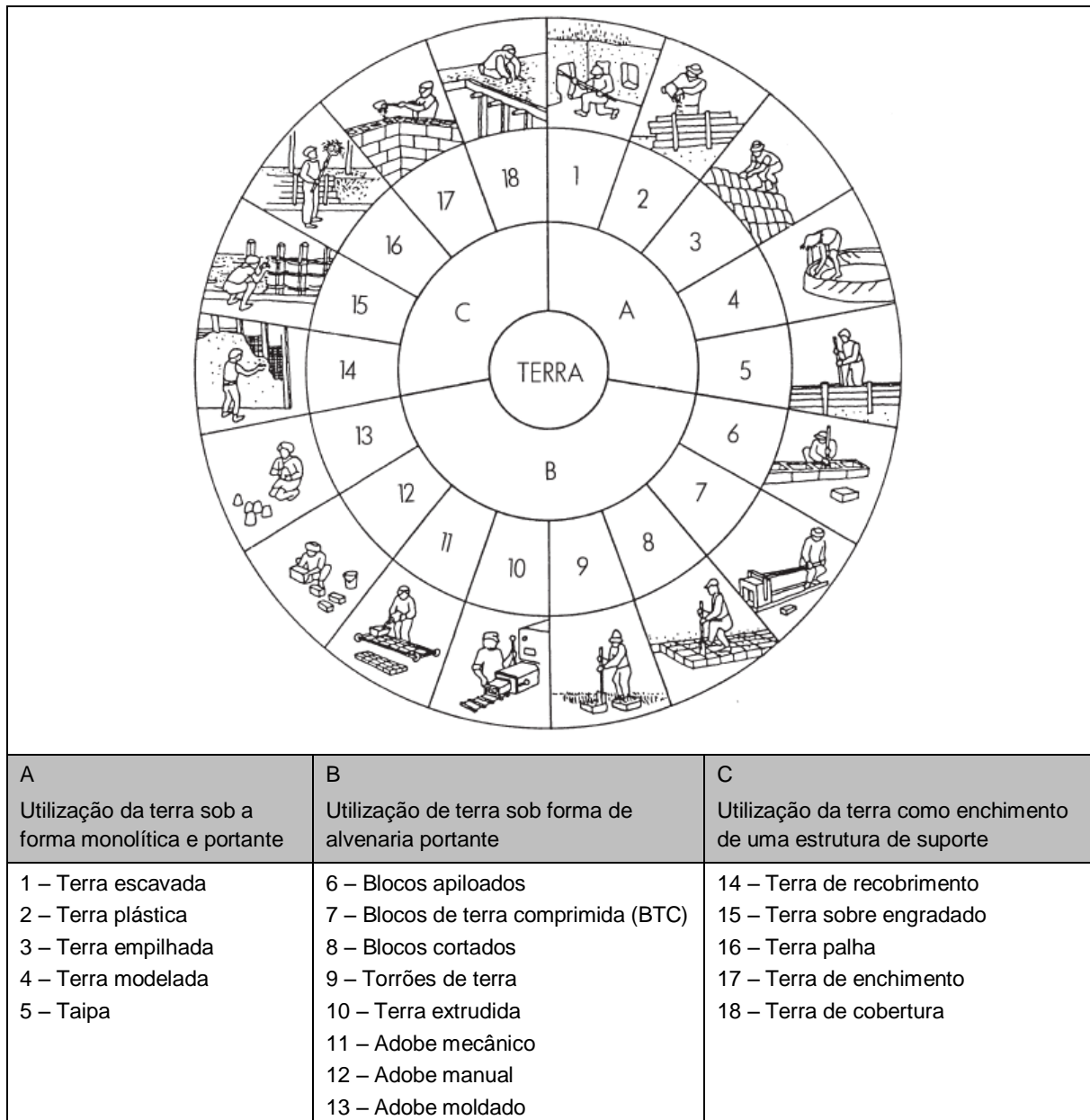


Figura 2.3 - Diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes famílias de sistemas de construção antigos e modernos, que utilizam terra como matéria-prima (Fernandes, 2006)

### 2.4.1. Blocos de terra comprimida – BTC

Esta técnica foi inventada com o intuito de melhorar as prestações do adobe, conferindo aos blocos características semelhantes a pequenos blocos de taipa. Como se diminui o volume de vazios do solo através da prensagem do solo, estes teoricamente ficariam mais resistentes e duráveis do que o adobe.

Esta técnica surgiu no século 18, embora de uma forma muito rudimentar, pelo Francês Francois Cointeraux, mas foi no ano de 1952 que o Colombiano Raul Ramirez inventou a primeira prensa, a CINVA-RAM. Nos anos 70 e 80 apareceu uma nova geração de máquinas, manuais e hidráulicas, no sentido de aumentar a produtividade da técnica.

Nesta técnica a consistência da terra utilizada é semelhante à da taipa e, em comparação com o material para a produção de adobe, tem um teor de água bastante inferior.

A vantagem deste material é que se pode fabricar com o solo do próprio terreno que, dependendo do tipo de solo, poderá ser necessário a estabilização.

Os BTC têm a vantagem de serem fáceis de fabricar e apresentarem dimensões bastante semelhantes entre eles, e diminuir a absorção de água quando comparado com um adobe.

### 2.4.2. Blocos de terra crua (Adobe)

É um dos sistemas de construção mais conhecidos e utilizados em todo o mundo, em que utiliza terra num estado plástico e se formam blocos de alvenaria, que se designam por adobes. Geralmente utiliza-se uma forma para facilitar o processo. Estes blocos são secos ao ar e podem ser adicionadas fibras aos adobes de forma a reduzir a sua fendilhação e retracção. Esta técnica é utilizada em solos predominantemente argilosos.

Quadro 2.2 - Vantagens e desvantagens do adobe segundo Proterra (2011)

Vantagens	Desvantagens
Fácil de fabricar, secar e empilhar	A baixa resistência à tracção e à flexão em relação às alvenarias executadas com BTC ou outro tipo de componente (tijolo e bloco cerâmico, bloco de cimento).
Material com considerável capacidade isolante devido a sua porosidade	A fabricação artesanal do componente requer esforço humano considerável e área ampla e arejada para a secagem
Permite a diversidade de formas e dimensões	A necessidade de muita água na sua fabricação
É 100% reciclável	A dificuldade de obter as dimensões regulares do componente
Não requer mão-de-obra especializada e o equipamento artesanal (molde) é muito económico	A qualidade do componente está condicionada à mistura e ao repouso de alguns dias da mistura para sua hidratação ("dormir" o barro).
É usado para construir paredes, arcos, abóbadas e cúpulas	Nas zonas afectadas por sismos, a cobertura em cúpula e abóbadas pesadas não são convenientes, e a alvenaria exige reforços e contrafortes apropriados
A matéria-prima é abundante	Absorve muita água devido a sua porosidade

Pode observar a utilização deste tipo de técnica tanto em construções antigas como em novas, sendo que geralmente a argamassa de assentamento utilizada é bastante semelhante à pasta utilizada nos adobes.

A norma peruana NTE E 080 (SENCICO, 2000) propõe a seguinte composição granulométrica para o material dos adobes: argila – 10% a 20%, silte – 15% a 25% e areia – 55% a 70%.

### **2.4.3. Blocos de terra cozida (Tijolo maciço)**

Os blocos de terra, quando cozidos, e pelo efeito da temperatura, passam a ter características de material cerâmico, sendo também designados por tijolos maciços.

Os materiais cerâmicos são definidos como materiais inorgânicos, não metálicos, com estruturas quase amorfas e que resultam da sinterização, a elevadas temperaturas, de misturas granulares compactas (Bogas, 2013; Boch e Nièpce (2007) citado por Bogas, 2013).

Estes materiais resultam essencialmente da cozedura de materiais silicatados com três elementos base: a argila, a sílica e o feldspato. A argila confere ao material antes da cozedura propriedades plásticas, permitindo moldar a forma pretendida; a sílica é o elemento não deformável dos materiais cerâmicos e o feldspato permite a redução da temperatura de fusão dos materiais (Bogas, 2013).

Este tipo de materiais apresenta geralmente características como: elevada dureza, comportamento frágil, resistência à flexão 5 a 10 vezes inferior à resistência à compressão, reduzida tenacidade e ductilidade, características isolantes - baixa condutividade térmica, resistência ao desgaste, resistência química e grande resistência mecânica a altas temperaturas (Bogas, 2013).

A resistência mecânica dos materiais cerâmicos é influenciada por vários factores, entre os quais a composição química, a microestrutura as condições de superfície e a temperatura de cozedura (Bogas, 2013).

Durante a cozedura do material cerâmico ocorrem diversos fenómenos em função dos intervalos de temperatura a que são submetidos. Tais fenómenos são apresentados no Quadro 2.3.

Para ter noção das diferenças que as temperaturas de cozedura provocam nos materiais cerâmicos, no Telheiro das Encostas do Castelo (TEC) foi feita uma representação de diversos materiais cerâmicos expostos a cozeduras a diferentes temperaturas e apresentados os produtos resultantes. Na Figura 2.1 são apresentados exemplos de tijolo, tijoleira, azulejo, entre outros materiais crus e cozidos a diferentes temperaturas.

Quadro 2.3 – Fenómenos ocorridos durante a cozedura de argilas (adaptado de Bogas, 2013).

Temperatura (°C)	Fenómenos ocorridos
20-150	Eliminação de água livre não eliminada na secagem ou entretanto absorvida do meio ambiente
<200	Eliminação da água coloidal intercalada entre lamelas de argilo-minerais
350-650	Combustão de matéria orgânica e dissociação de compostos sulfurosos
450-650	Transformações irreversíveis de decomposição dos minerais argilosos com perda de água de constituição. Neste fenómeno endotérmico a caulinite é transformada em metacaulinite tornando-se instável
570	Transformação do quartzo em quartzó com expansão violenta no aquecimento e contracção violenta no arrefecimento
800-950	Decomposição dos carbonatos e libertação de CO <sub>2</sub>
>700	Início da sinterização com reacções químicas da sílica, alumina e elementos fundentes originando silico-aluminatos complexos
>1000	Início da gressificação. Amolecimento dos silico-aluminatos e assimilação de pequenas partículas menos fundentes, conferindo maior compacidade e dureza ao corpo. Ocorre contracção resultante da densificação
1000-1100	No caso de caulinites, transformação de mulite cuja estequiometria varia entre 3AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub> a 2AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>

Na reprodução é possível verificar uma alteração cromática do material com o efeito da temperatura. Também é possível verificar que até à temperatura de 1000°C, o material mantém a sua forma, no entanto aos 1200°C, na maioria dos materiais, estes deformam-se por completo, perdendo as suas propriedades.

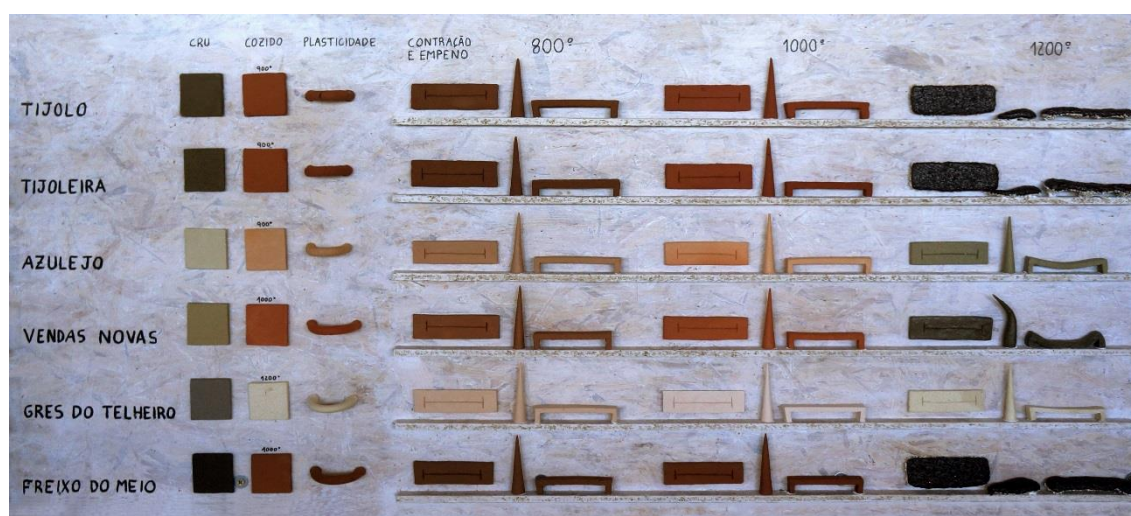


Figura 2.4 – Amostras de matérias-primas cozidas a várias temperaturas

## 2.5 Materiais

### 2.5.1. Solo

#### Constituição

A terra, também designada em algumas circunstâncias por solo, é composta por matéria mineral e matéria orgânica, contendo também espaços vazios, denominados poros, que são preenchidos por ar ou água. A matéria orgânica é originada de organismos vivos ou em decomposição, sejam eles de origem animal ou vegetal.

A matéria mineral é proveniente da desintegração de rochas, em fenómenos designados por intemperismo e resultantes da acção de agentes físicos, químicos e biológicos. A composição da matéria mineral depende da proporção e natureza dos minerais que a constituem (Gomes, 2013).

É aceite, pela maioria dos autores, a ideia de que nem todos os tipos de solos são aplicáveis na construção. As camadas superficiais de solo, constituídas por grande quantidade de matéria orgânica não devem ser utilizadas, uma vez que estes materiais absorvem muita água e são muito compressíveis (Gomes, 2013).

A matéria mineral é constituída por partículas minerais de diferentes tamanhos: seixos, areias, siltes e argilas. O comportamento dos materiais poderá variar ou não em função dos teores de humidade a que estão sujeitos e é essa uma das principais características que os diferencia. Consequentemente, também o solo apresenta comportamentos diferentes em função da quantidade de material arenoso, siltes e argilas que o constituem e da quantidade de água que presente no solo (Gomes, 2013).

Os seixos e as areias são elementos sem capacidade de coesão, quando secos, pelo que para serem utilizados como matéria-prima na construção é necessária a adição de ligantes. Os siltes são materiais cuja capacidade de coesão varia em função do teor de humidade, apresentando boa coesão quando húmidos. Já as argilas apresentam comportamentos muito diferentes em função do teor de humidade, sendo consideradas instáveis. No entanto, apresentam plasticidade e coesão na presença de água o que as torna um excelente ligante. Assim, quando o solo tem uma pequena quantidade de argilas na sua composição, estas servem de ligante, garantindo a coesão do solo. Por outro lado, solos com grande quantidade de argila são muito instáveis e impróprios para construção, uma vez que ficam com grande capacidade de absorção de água, o que leva à alteração do seu volume (Gomes, 2013).

#### Classificação de solos para construção

Dado que o comportamento do solo varia em função da proporção dos seus componentes é fundamental proceder à sua caracterização e classificação. Para tal são feitos ensaios laboratoriais que visam estudar a granulometria das partículas (análise granulométrica), determinar os limites de consistência, determinar o teor de água óptimo para o qual se obtém a máxima compacidade do solo (ensaio de Proctor), entre outros.

O grupo CRAterre classificou os solos segundo diversos parâmetros, referidos por Doat et al (1979). Tais classificações serão apresentadas de seguida no presente trabalho.

A classificação segundo a massa volúmica seca dos solos após compactação (obtida no ensaio de Proctor), representada no Quadro 2.4, divide-se em quatro intervalos de valores que correspondem a classes entre medíocre e excepcional.

Quadro 2.4 – Massa volúmica seca após compactação (Doat et al, 1979)

<b>Massa volúmica seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Classificação</b>
1650-1760	Medíocre
1760-2100	Muito satisfatório
2100-2200	Excelente
2200-2400	Excepcional

No que respeita aos limites de consistência foram definidos pelo CRAterre valores recomendados e valores máximos e mínimos que os solos utilizados em construção devem cumprir. Tais valores são apresentados no Quadro 2.5.

A plasticidade dos solos é também classificada entre fraca a forte em função de três intervalos de índices de plasticidade, representado no Quadro 2.6.

Quadro 2.5 – Limites de consistência para solos utilizados na construção (Doat et al, 1979)

	<b>Valores recomendados</b>	<b>Valores máximos e mínimos</b>
Índice de plasticidade	7-18	7-29
Limite de liquidez	30-35	25-50
Limite de plasticidade	12-22	10-25
Limite de retracção	<Teor de água óptimo	8-18

Quadro 2.6 – Classificação da plasticidade de um solo (TORGAL et al, 2009)

<b>Ip</b>	<b>Plasticidade</b>
5-10	Fraca
10-20	Média
>20	Forte

O índice de actividade das argilas (AC) resulta do quociente entre o índice de plasticidade e o teor de argilas. Quanto maior for este parâmetro, maior será a superfície específica da argila e

portanto maior a sua expansibilidade e deformabilidade. A classificação segundo o grau de actividade das argilas distingue as argilas em quatro classes desde pouco reactivas a muito reactivas e é apresentada no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Índice de actividade de argilas (Doat et al, 1979)

<b>Ac</b>	<b>Classificação da argila</b>
<0,75	Pouco reactiva
0.75-1,25	Normalmente reactiva
1,25-2,0	Activa
>2,0	Muito activa

Para classificar os solos em classes segundo o seu diâmetro, o LNEC definiu os intervalos que se apresentam no Quadro 2.8

Quadro 2.8 – Classificação do solo segundo o seu diametro

<b>Tipo de Material</b>	<b>Fracção</b>
Seixo	60 a 2 mm
Areia	2 a 0.06 mm
Silte	0,06 a 0,002 mm
Argila	<0.002 mm

### Estabilização de solos

Nem todos os solos são adequados à construção em terra, ou por outro lado, poderão ser adequados a aplicar numa determinada técnica construtiva mas não aplicável a outra. Assim, com vista a otimizar as características dos solos, estes poderão ser estabilizados (Gomes, 2013).

A estabilização pode ser mecânica, física ou química e consiste na alteração das características dos solos de forma a torna-los aptos à aplicação num determinado tipo de técnica construtiva (Torgal et al., 2014).

A estabilização mecânica consiste na compactação do solo de forma a provocar um rearranjo das partículas e minimizar os vazios.

A estabilização física é realizada através da inserção de fibras no solo, tais como cânhamo, casca de arroz, palha, entre outros, ou pela correcção da composição granulométrica do solo. Por correcção da granulometria, quer-se dizer, que quando um solo é muito argiloso e plástico, pode ser adicionado material arenoso. O contrário também é válido.

A estabilização química consiste na adição de ligantes (cimento ou cais) ou aditivos aos solos.

No capítulo seguinte são apresentadas as reacções que ocorrem na estabilização química com cal e com cimento.

### **2.5.2. Ligantes e estabilizantes**

A cal era, até ao aparecimento do cimento, o ligante mais vulgarmente utilizado. Quando o cimento surgiu no mercado, este passou a ser o ligante utilizado em todas as situações tendo as cais caído em desuso. No entanto estes dois materiais têm características bastante divergentes e a escolha de um destes tipos de ligantes deve ser criteriosa e em função da aplicação que se pretende.

Os referidos ligantes pertencem ao grupo dos ligantes hidrófilos que se dividem em aéreos e hidráulicos. A cal aérea pertence, como a própria designação indica, ao grupo dos ligantes aéreos. Já o cimento e a cal hidráulica pertencem ao grupo dos ligantes hidráulicos.

Apesar das diferentes características, qualquer um dos ligantes referidos é produzido pela cozedura de calcários que, em função da sua pureza, farão variar os teores de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e de argilas o que conduz às diferentes propriedades dos materiais. Note-se que, quanto maior o teor de argilas presente no ligante, mais hidráulico este será (Fontes, 2013).

Os calcários são rochas que existem em abundância na natureza. No entanto estes geralmente estão associados a argila. O calcário para ser considerado puro deverá ter cerca de 100% de carbonato de cálcio na sua composição. Quando contém algum teor de argilas, é designado por calcário margoso. No caso em que o teor de argilas é superior ao teor de carbonato de cálcio então tem-se marga calcária (Coutinho, 1988). Em função da matéria-prima cozida obtém-se ligantes com diferentes propriedades. Além da sua utilização para formulação de argamassas, as cais e os cimentos, poderão ser utilizados em misturas com solos, actuando como estabilizantes químicos no sentido de melhorar as suas características, podendo ajudar a melhorar por exemplo a sua resistência física, a sua resistência ao desgaste, e diminuindo a capilaridade do material entre outras.

#### *Cimento Portland*

O cimento Portland é um ligante hidráulico que resulta da calcinação de margas calcárias a temperaturas entre 1300 a 1500°C (Faria, 2012). A marga calcária contém carbonato de cálcio e argilas, sendo estas compostas por silicatos de alumínio e ferro. Na produção de cimentos artificiais, poderão ainda ser adicionadas outros compostos que contenham sílica, alumina ou óxido de ferro (Gomes, 2013).

Antes da calcinação, as matérias-primas são moídas e reduzidas a pó. Com a acção da temperatura forma-se o clínquer, o principal constituinte do cimento. O clínquer é composto por silicato bicalcico [ $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2 - \text{C}_2\text{S} - \text{belite}$ ], silicato tricálcico [ $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S} - \text{alite}$ ], aluminato tricálcico [ $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A} - \text{celite}$ ] e ferro-aluminato tetracálcico [ $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF} - \text{brownmillerite}$ ] (Faria - Rodrigues, 2004).

Para completar a produção de cimento, o clínquer é posteriormente moído e é-lhe adicionado gesso, com a função de retardador da presa. Poderão ainda ser utilizados outros aditivos com diferentes finalidades. Estes aditivos são por exemplo: filer calcário, escórias de alto forno, materiais pozolânicos naturais ou artificiais (Gomes, 2013).

O cimento é o ligante mais utilizado na formulação de argamassas, uma vez que a sua presa ocorre por reacções de hidratação, ocorrendo mesmo quando as argamassas estão imersas, e as argamassas adquirem resistências mecânicas consideráveis logo a partir das primeiras horas de cura. As resistências mecânicas das argamassas de cimento são geralmente muito elevadas, o que as torna potencialmente incompatíveis com materiais mais fracos.

Actualmente ainda é comum verificar-se o uso de argamassas cimentícias para revestimento de construções em terra. No entanto, apesar destas argamassas serem mais resistentes à erosão, também são mais rígidas que o suporte e menos permeáveis ao vapor de água. Assim a aplicação de argamassas com base em cimento sobre suportes construídos em terra, conduz a uma aceleração da sua degradação. Existem mesmo casos registados deste fenómeno, verificados por exemplo na Escócia e mesmo em Portugal (Gomes, 2013).

A estabilização química de um solo com recurso a cimento poderá ocorrer por dois mecanismos diferentes, em função do teor de cimento que é adicionado ao solo. Quando são aplicados teores mais elevados de ligante, ocorre um aumento da resistência mecânica do solo devido à acção aglutinante do cimento, formando núcleos interligados distribuídos pela massa de solo.

Quando são utilizados menores teores de cimento, ocorre uma modificação da fracção argilosa do solo, levando à diminuição da sua plasticidade e eventualmente ao aumento da sua resistência mecânica. Neste caso, o cimento forma núcleos isolados na massa de solo (Torgal et al., 2013).

#### Cal aérea cálcica

A cal é considerada aérea quando o teor de carbonato de cálcio na sua composição é superior a 95%. Tal acontece quando a sua produção é feita pela cozedura de calcários considerados puros.

A calcinação da rocha calcária, a uma temperatura entre os 800 e os 900°C, resulta na produção de óxido de cálcio (CaO), conhecido por cal viva, e na libertação de dióxido de carbono. A cal viva é um material muito reactivo e instável pelo que tem de ser extinta por hidratação. A reacção do óxido de cálcio com a água resulta em hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>], vulgarmente denominado por cal apagada ou extinta (Faria-Rodrigues, 2004).

A presa de uma argamassa com base em cal aérea acontece apenas através de uma reacção de carbonatação, isto é, o hidróxido de cálcio combina-se com o dióxido de carbono voltando a originar carbonato de cálcio, a matéria-prima. Assim, o processo de endurecimento de uma argamassa de cal aérea está limitado ao contacto com o ar, não ocorrendo quando a argamassa está imersa e sendo muito demorado em ambientes de elevada humidade relativa (Fontes, 2013).

Quando a cal é utilizada como estabilizante ocorrem três tipos de reacções: permuta iónica e floculação, reacção pozolânica e carbonatação. A permuta iónica e a floculação ocorrem logo após a adição de cal ao solo e promovem a diminuição da plasticidade do solo, tornando-o friável. Assim a argila perde plasticidade, coesão e expansibilidade, mas a sua trabalhabilidade aumenta.

A reacção pozolânica é uma acção lenta e que acontece em condições climáticas quentes. Esta reacção promove a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio, através da reacção da cal, a sílica e a alumina presentes na argila. Os materiais dissolvidos na reacção combinam-se com iões de cálcio, resultantes da floculação, e formam produtos cimentícias que interligam as partículas argilosas.

A reacção de carbonatação resulta da reacção entre a cal e o dióxido de carbono. Tal reacção conduz à alteração química dos minerais argilosos, formando carbonato de cálcio. Esta reacção é inversa à produção de cal, pelo que deve ser evitada, uma vez que posteriormente prejudica a reacção pozolânica e o alcance de determinadas resistências mecânicas.

As propriedades da cal influenciam bastante a mistura solo-cal, pelo que é fundamental identificar as propriedades físico-químicas da cal.

A estabilização com cal destina-se sobretudo a solos com fracção fina muito plástica e expansiva (Torgal et al., 2009).

#### Cais com propriedades hidráulicas

A cal hidráulica apresenta propriedades intermédias entre a cal aérea e o cimento. Por um lado a sua hidraulicidade permite que a presa das argamassas com base neste ligante ocorra em ambientes de elevada humidade relativa e até quando imersa. Esta característica contribui para a resistência da argamassa nas primeiras horas de presa, ao contrário do verificado no caso de argamassas com base em cal aérea. Por outro lado, as argamassas formuladas com esta cai apresentam resistências mecânicas muito inferiores às das argamassas formuladas com cimento, tornando-as substancialmente mais compatíveis com alvenarias antigas (Fontes, 2013).

A cal hidráulica natural é produzida pela calcinação de calcários margosos com percentagens de argila entre 5% a 20%. Anteriormente, a temperatura para a calcinação era na ordem dos 900 a 1200°C (Sequeira et al., 2007). No entanto actualmente em Portugal a cal hidráulica natural é produzida a temperaturas inferiores a 900°C, temperaturas muito próximas das de produção de cal aérea. Neste ponto, e comparativamente ao consumo de energia para produção de cimento, considera-se que as cais hidráulicas naturais, bem como as cais aéreas, são bastante mais sustentáveis (Faria, 2012).

As argilas são compostas essencialmente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Com a cozedura da rocha calcária, obtém-se óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e ainda silicato bicálcico ( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$  - belite) e aluminato tricálcico ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$  - celite), compostos que conferem hidraulicidade à cal (Fontes, 2013; Sequeira et al., 2007).

Também neste caso é necessário proceder à extinção da cal viva (óxido de cálcio), devido à instabilidade deste produto. Com a hidratação da cal viva produz-se a denominada cal apagada (hidróxido cálcio).

O endurecimento da cal hidráulica ocorre inicialmente por hidratação da belite e da celite e, posteriormente, por carbonatação do hidróxido de cálcio, verificando-se assim a fase hidráulica e a fase aérea (Sequeira et al, 2007).

Com a entrada em vigor da nova norma NP EN 459:2011 (IPQ, 2011), resultado das alterações na norma europeia EN 459:2010 (CEN, 2010), a produção de cais hidráulicas naturais tornou-se mais rigorosa e controlada. Segundo a norma, para uma cal hidráulica ser considerada natural, não pode conter qualquer teor de adições. Assim, as cais hidráulicas passaram a ser classificadas como cais hidráulicas (HL) cais formuladas (FL) ou cais hidráulicas naturais (NHL).

As cais hidráulicas (HL) e as cais formuladas (FL) contêm adições tais como gesso, filleres ou clínquer do cimento Portland. A produção destas cais ocorre a temperaturas superiores às temperaturas de produção da cal hidráulica natural, pelo que se tornam menos sustentáveis (Faria et al., 2012).



### 3. DESENVOLVIMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1 Descrição geral da campanha experimental

Com a realização do presente trabalho experimental pretende-se definir os procedimentos de ensaio a adoptar para avaliar o comportamento de blocos de terra a utilizar na concepção de alvenarias e, como validação de tais procedimentos, proceder à caracterização de diferentes tipos de blocos de terra.

Na campanha experimental são analisados cinco lotes de blocos, que se distribuem por três tipos de fabricação:

- 2 lotes de blocos maciços de terra comprimida (BTC) provenientes de Espanha (Badajoz) e Montemor-o-Novo (Telheiro da Encosta do Castelo), designados, respectivamente, como BTC B - de Badajoz - e E – da Encosta;

- 2 lotes de blocos maciços de terra crua, provenientes de Évora e de Montemor-o-Novo, que são designados como C – crus – e como TC respectivamente;

- 1 lote de tijolos maciços cozidos, produzidos a partir do lote de tijolos crus de Montemor-o-Novo designados como TB (tijolo “burro”).

Os lotes E, TC e TB são produzidos no Telheiro da Encosta do Castelo de Montemor-o-Novo, propriedade da Associação Cultural Oficinas do Convento. Os blocos do Lote E foram produzidos em Agosto de 2012 e o responsável pela produção foi o arquitecto Nuno Grenha. Nesta produção foi utilizada uma prensa manual da TERSTARAM. Não foi possível saber a data de fabrico dos lotes TC e TB; foram transportados para os laboratórios do DEC-FCT em Abril de 2013.

Os blocos de terra crua, TC, apesar de se poder prever a sua aplicação neste estado, estes apenas foram mantidos nestas condições com o intuito de se estudar melhor as características entre o material cerâmico e o material cru, de forma a ter uma comparação entre dois materiais (cru e cozido).

O lote B foi fabricado em Almendralejo (Espanha), na data de 2 de Agosto de 2012, sendo o responsável pela produção o arquitecto Miguel Rocha. Nesta produção foi utilizada uma prensa hidráulica, o que originou maiores forças de compactação dos BTC.

Os blocos do lote E foram estabilizados com uma percentagem de 6,25% de cal hidráulica HL5 da Secil, face à massa de solo, e os blocos do lote B foram estabilizados com cal aérea e cimento, numa proporção de ligante/solo de 5% e 1,7% em massa, respectivamente. Os restantes blocos não foram estabilizados quimicamente com qualquer ligante.

O lote C foi proveniente de Évora, mais propriamente do Telheiro do Gaio, não se conhecendo a sua data de fabrico.

Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização às terras utilizadas em cada lote de blocos e posteriormente foram realizados ensaios aos blocos.

No Quadro 3.1 é apresentado um resumo da designação de cada lote em estudo.

Quadro 3.1 – Quadro resumo dos lotes de blocos em estudo

Lote de blocos	Designação
BTC's da Encosta, Montemor-o-Novo	E
BTC's de Badajoz, Espanha	B
Tijolos crus de Évora	C
Tijolos crus de Montemor-o-Novo	TC
Tijolos cozidos de Montemor-o-Novo	TB

Para melhor compreensão de conteúdos nesta dissertação definiu-se as faces superiores e inferiores dos blocos da mesma forma em que foram produzidos (Figura 3.1, Figura 3.2).

Nos lotes C, TC e TB consegue-se distinguir a olho nu a face superior que foi afagada pelas mãos no processo de fabrico, e a face inferior, mais irregular, que ficou em contacto com o chão.



Figura 3.1 – Faces superiores dos blocos

Nos lotes E e B, foi designado que a face em que se consegue visualizar grãos de maior dimensão seria a face superior, como se consegue comprovar na Figura 3.1 e na Figura 3.2.

Estes foram produzidos a partir de terras locais e portanto com características diferentes. De salientar que os vários lotes de blocos de Montemor foram produzidos a partir da mesma terra, no entanto o lote E, tem incorporação de um material reciclado proveniente da britagem de resíduos de construção e demolição.

O material cerâmico de produzido no Telheiro das Encostas do Castelo (TEC), caracteriza-se por uma cor avermelhada, podendo-se designar de produtos de barro vermelho, como designa (bogas, 2013), apresentando normalmente as seguintes características: elevada porosidade, grão

grosseiro, superfície e áspera e elevada absorção. Sendo estes produtos processados a baixas temperaturas, na ordem de 850°C a 1050°C.7



Figura 3.2 – Faces inferiores dos blocos

A qualidade deste tipo de materiais poderá ser avaliada de uma forma bastante empírica através do som que é provocado por percussão das peças. As bem cozidas produzem um som limpo e claro, enquanto as mal cozidas ou fissuradas têm um som cavo e as demasiado cozidas o som é muito agudo (Bogas, 2013)

Relativamente à designação dos solos em estudo, designou-se o solo de Badajoz com a sigla SB, o solo de Montemor-o-Novo, proveniente da Herdade da Adúa, por SM e o material obtido a partir de resíduos de construção e demolição como RCD.

O solo de Évora, que deu origem ao lote C, não foi analisado, uma vez que à data da recepção do lote, já se havia terminado a campanha experimental de análises aos solos e não houve possibilidade de realizar análise posterior.

No Quadro 3.2 é apresentado um resumo das siglas referentes aos tipos de solos.

A Câmara Municipal de Montemor-o-Novo possui uma britadeira que processa os resíduos provenientes das empresas de construção civil existentes no município, evitando que estes tenham de ser depositado em aterro e conferindo-lhes uma nova utilização. Esta utilização está dependente da granulometria do material e tem sido aplicado em arranjos dos caminhos rurais e como camadas base de passeios pedonais. Esta aquisição foi feita através do projecto REAGIR tendo sido co-financiado pela comissão europeia através do programa LIFE – Ambiente.

Quadro 3.2 – Quadro resumo dos solos utilizados na produção dos blocos.

Lote de blocos	Designação lote	Terra de fabricação e designação
BTC's da Encosta, Montemor-o-Novo	E	Solo de Montemor (SM) + RCD
BTC's de Badajoz, Espanha	B	Solo de Badajoz (SB)
Tijolos crus de Évora	C	-
Tijolos crus de Montemor-o-Novo	TC	Solo de Montemor (SM)
Tijolos cozidos de Montemor-o-Novo	TB	Solo de Montemor (SM)

A proporção de cada material adoptado na produção do lote E foi definida através de ensaios empíricos realizados previamente à produção dos blocos. Tais ensaios consistiram, por exemplo, na auscultação do som da batida do dedo e a queda a partir de determinada altura. Os resultados foram interpretados pelo operador que realizou os ensaios e foi escolhida a mistura que pareceu apresentar melhor qualidade. Os RCD produzidos têm vários calibres consoante a granulometria do material. O calibre que tem uma menor granulometria corresponde a materiais até aos quatro milímetros de diâmetro, sendo os materiais do referido calibre os mais abundantes no estaleiro. Por esse motivo, foi essa a gama de material utilizada para este estudo.

## **3.2 Caracterização das matérias-primas**

Foram realizados ensaios de identificação e classificação das matérias-primas, nomeadamente dos solos.

### **3.2.1. *Análise granulométrica***

#### Descrição

Para as amostras em estudo, foram realizadas peneirações por via seca segundo a especificação E-239 (LNEC, 1971), de modo a classificar os solos grossos (seixo e areia), e peneiração por via húmida, para classificar os finos (siltes e argilas), isto é, todo o material que passou pelo peneiro de malha ASTM 0,0074 mm (#200). Este ensaio realizou-se segundo a especificação E-196 (LNEC, 1966).

Foram realizados ensaios de análise granulométrica pois são fundamentais para identificar e classificar os solos envolvidos nos provetes em estudo. Após a realização das análises aos solos SB, SM e ao RCD, foram registados os resultados na forma de curvas granulométricas e respectivas tabelas.

#### Procedimentos

Para a análise granulométrica por via húmida, as amostras foram preparadas segundo o definido na especificação E-195 (LNEC, 1966).

Em laboratório as amostras dos solos em estudo secaram expostas ao ar e os aglomerados de solo foram desagregados com a ajuda de um almofariz e pilão, de modo a não reduzir o tamanho individual das partículas.

Posteriormente, fez-se um esquarteamento da amostra e separaram-se as quantidades definidas pela norma para o procedimento dos ensaios.

De seguida, foram realizados ensaios de análise granulométrica. Estes consistem na distribuição de solo, expressa em massa em função da dimensão das partículas. Foi utilizada uma sequência de peneiros, através dos quais se fez passar as amostras dos solos em estudo. A malha dos peneiros diminui gradualmente do primeiro peneiro para o último. O ensaio é feito com recurso a

um equipamento mecânico que agita a sequência de peneiros. Após o ensaio, através da medição da massa de solo retido em cada peneiro, é possível obter a distribuição do solo em percentagem e a sua identificação.

Esta especificação tem como objectivo determinar quantitativamente a distribuição por dimensões das partículas grossas a médias que constituem um solo sendo posteriormente concluída com a sedimentação para se conseguir classificar os solos finos, isto é, todas as partículas que tenham dimensões inferiores a 0,074mm, nomeadamente os que passam o peneiro 200 da série ASTM (#200).

As amostras de solo que passaram pelo #200 são analisadas por sedimentação, de forma a distinguir as percentagens de finos existentes e classificar o solo. O ensaio de sedimentação consiste na medição da velocidade de queda das partículas do solo em suspensão numa proveta com água, uma vez que cada partícula de solo tem o seu peso volúmico, o que determina a sua velocidade de queda). A velocidade de queda é obtida através da medição do peso volúmico da suspensão a diferentes intervalos de tempo definidos na especificação.

Previamente ao início do ensaio, obstruiu-se a abertura da proveta, de 1000 ml, com a mão e agitou-se vigorosamente. Posto isto, a proveta foi rapidamente colocada na bancada e o cronómetro activado.

Introduziu-se o densímetro na proveta até uma profundidade ligeiramente superior à posição de flutuação, de modo a não influenciar o resultado. As leituras foram efectuadas ao fim de 1 minuto, 2 minutos e 5 minutos. Posteriormente, o densímetro foi removido lentamente, lavado com água destilada e conservado numa outra proveta com água destilada à mesma temperatura de suspensão. Uma vez mais, introduziu-se o densímetro na suspensão para as leituras seguintes: aos 15 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 250 minutos, 1440 minutos (24 horas) e 2880 minutos (48 horas). Depois de cada leitura  $L_s$ , removeu-se novamente o densímetro, seguindo-se o mesmo procedimento anteriormente referido. A operação de remoção e lavagem do densímetro foi elaborada de modo cuidado para evitar a perda de finos durante esta a perturbação das partículas que ainda suspensas.

A especificação estabeleceu que entre a temperatura da suspensão e a da sala não pode existir uma diferença superior a 0,5°C, após cada leitura do densímetro. No intervalo das leituras, a proveta esteve obstruída com um papel de filtro de modo a que não evitar qualquer interferência do exterior.

Para todos os solos em estudo realizou-se a calibração do densímetro para ajustar as medições efectuadas à escala da proveta utilizada. Recorreu-se a um densímetro com o volume de 32,0 cm<sup>3</sup>.

Visando determinar a percentagem siltes e argila nas amostras foi utilizada a lei de Stokes.

Foi necessário recorrer à peneiração a húmido devido às propriedades de coesão da argila que se não fossem devidamente quebradas, o resultado iria ser adulterado.

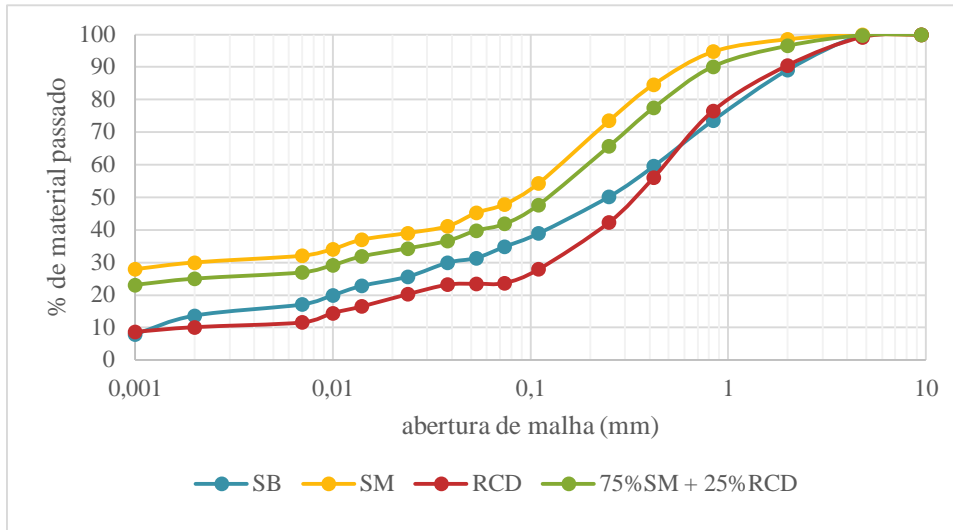


Figura 3.3 – Curva granulométrica do solo SB, SM, RCD e da mistura dos dois últimos

Quadro 3.3 – Resumo das percentagens de cada constituinte do solo

Tipo de Material	Fracção	SB (%)	SM (%)	RCD (%)	25% SM + 75% RCD
Seixo	60 a 2 mm	10.9	1.5	9.5	3.5
Areia	2 a 0.06 mm	54.3	50.6	66.9	54.7
Silte	0,06 a 0,002 mm	9.1	17.9	15.0	17.2
Argila	<0.002 mm	25.7	30.0	8.6	24.6

Pela observação do Quadro 3.3, percebe-se que os solos são constituídos maioritariamente por material granular, areia e têm ainda uma percentagem na mesma ordem de grandeza em relação a siltes. A grande diferença entre estes solos é que o solo SB tem uma maior percentagem de seixo do que o solo SM e o solo SM tem uma maior percentagem de argila.



Figura 3.4 – Fotografia do resultado da peneiração a seco

Legenda: a) SB, b) SM, c) RCD

### **3.2.2. Limites de Atterberg**

#### Determinação dos Limites de Consistência - NP 143- 1969

A norma NP 143 (IPQ, 1969), estabelece o procedimento de cálculo dos limites de consistência ou de Atterberg, isto é, os limites de liquidez (LL ou WL) e de plasticidade (LP ou WP), para as amostras de solos. Estes ensaios são realizados com o material que passa no #4 (0,425mm) da série ASTM.

É importante calcular estes limites porque os blocos de solo são constituídos por silte e argila (solos finos) e a variação do teor em água pode conduzir a diferentes estados destes solos. A título de exemplo, um solo argiloso que tenha um baixo teor em água não será moldável; se ainda se continuar a adicionar água, o solo atingirá um estado moldável, sendo considerado num estado plástico; para concluir, no caso da adição de água se mantiver, o solo atinge um estado líquido, comportando-se como um fluido.

#### Determinação Limite de Liquidez (LL ou WL)

Segundo a NP- 143 (IPQ, 1969). “A determinação do limite de liquidez é somente aplicável a solos com cerca de 30% ou mais, em massa de partículas com dimensões inferiores a 0.05mm”

O limite de liquidez (LL) de uma amostra de solo é o teor em água correspondente a 25 pancadas na concha de Casagrande, obtido por interpolação numa recta que relaciona o teor em água de cada um dos ensaios, com o número de pancadas aplicadas.

Foram analisados os solos SB e SM. Para cada tipo de solo foram realizados quatro ensaios.

No início do ensaio, foi colocada no peneiro #40 (0,42mm) uma massa de 500g do solo a ensaiar. Do material passado foi apenas utilizada uma massa de 100g, tendo sido amassada com água destilada, com recurso a uma espátula, até se formar uma pasta homogénea e consistente. Adicionou-se mais água à mistura, sempre que necessário, e envolveu-se a amostra durante mais 5 minutos.

A pasta foi colocada na concha de Casagrande de modo a obter uma camada, não muito comprimida, com a espessura de 1 cm e com a superfície nivelada. Fez-se um sulco aberto no provete, na extensão do seu comprimento e com uma largura de 1 cm. Foram aplicadas as pancadas na concha de Casagrande. O ensaio foi dado por terminado quando se juntaram os dois bordos do provete. Foi registado o número total de pancadas necessário aplicar para a conclusão do ensaio.

Após a conclusão do ensaio, foi recolhida uma massa da amostra na concha, correspondente ao material localizado na união dos bordos do sulco inicial em toda a sua espessura. A toma foi colocada numa capsula de alumínio e a sua massa foi medida logo após a recolha, para garantir conservação do teor de humidade. Posto isto, a capsula foi inserida na estufa até a variação da massa ser inferior a 0,1% entre medições consecutivas. Foi registada a massa seca da amostra.

O teor de humidade da amostra foi obtido pelo quociente entre a massa de água da amostra, resultado da diferença entre a massa da toma húmida e da toma seca, e a massa da toma seca.

Nos primeiros ensaios o número de pancadas necessárias para a união do sulco foi baixo, o que significa que as misturas estavam muito líquidas. Assim para os ensaios posteriores foi sendo adicionada mais amostra do solo ao preparado.

Com os resultados de teor de humidade das amostras de solo e com o número de pancadas na Concha de Casagrande para cada ensaio foi traçada uma regressão linear que relaciona os dois parâmetros. Foram calculados valores de limite de liquidez para cada ensaio realizado e posteriormente o seu valor médio que representa o limite de liquidez do solo em estudo. No Quadro 3.4 e Quadro 3.5. encontram-se os resultados do ensaio referido.

Quadro 3.4 – Determinação do limite de liquidez para o solo SB

Nº da Cápsula		1	2	3	4
<b>A</b>	Massa da cápsula + Toma húmida (g)	18.99	19.59	26.49	21.27
<b>B</b>	Massa da cápsula + Toma seca (g)	17.06	17.55	23.36	19.04
<b>C = A - B</b>	Massa de água na toma (g)	1.93	2.04	3.13	2.23
<b>D</b>	Massa da Cápsula (g)	8.96	8.53	8.42	8.41
<b>E = B - D</b>	Massa da Toma Seca (g)	8.10	9.02	14.94	10.63
<b>W=100 x C/E</b>	Teor de Humidade (%)	23.83	22.62	20.95	20.98
<b>P</b>	Número de pancadas	14	19	28	35
<b>LL</b>	Limite de Liquidez (%)	22.16	21.84	21.27	21.95
<b>LL - MÉDIA (%) - 21.8</b>					

O limite de liquidez do solo SB, que corresponde ao teor em água para 25 pancadas, assume o valor médio de 21.8%. O coeficiente de forma  $R^2$  permite afirmar que a recta de regressão linear se correlaciona razoavelmente com os valores obtidos tornando viável o valor de limite de liquidez obtido, existindo apenas dispersão pouco significativa nesta amostra.

Quadro 3.5 – Determinação do limite de liquidez para o solo SM

Nº da Cápsula		1	2	3	4
<b>A</b>	Massa da cápsula + Toma húmida (g)	30.16	20.97	21.61	30.69
<b>B</b>	Massa da cápsula + Toma seca (g)	28.19	18.67	19.43	28.60
<b>C = A - B</b>	Massa de água na toma (g)	1.97	2.30	2.18	2.09
<b>D</b>	Massa da Cápsula (g)	20.98	10.26	11.05	20.69
<b>E = B - D</b>	Massa da toma Seca (g)	7.21	8.41	8.38	7.91
<b>W=100 x C/E</b>	Teor de Humidade (%)	27.32	27.35	26.01	26.42
<b>P</b>	Número de pancadas	14	19	28	35
<b>LL</b>	Limite de Liquidez (%)	25.41	26.41	26.41	27.64
<b>LL - MÉDIA (%) - 26.47</b>					

Verifica-se que o limite de liquidez assume o valor de 26.47%. Os valores obtidos correlacionam-se razoavelmente, existindo uma dispersão pouco significativa. Quadro 3.5

Após comparação com o Quadro 2.5, verifica-se que os dois solos estão fora do intervalo recomendável e apenas o Solo SM apresenta características superiores ao mínimo admissível.

Determinação do limite de plasticidade (LP ou WP)

A determinação do limite de plasticidade é somente aplicável a solos com cerca de 30%, ou mais, em massa, de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm NP- 143 (IPQ, 1969) como no caso do anteriormente referido do LL. Foram realizados ensaios aos solos SB e SM. Para cada um dos solos foram testados 4 provetes, correspondendo o limite de plasticidade ao valor médio dos teores de humidade dos 4 provetes.

A amostra de solo foi preparada segundo o procedimento descrito no caso do ensaio do limite de liquidez, ou seja, utilizaram-se 100g de solo passadas no peneiro nº40 da série ASTM que foram amassados com água destilada até obtenção de uma pasta.

Rolou-se uma porção da amostra com a palma da mão sobre uma placa de vidro, até se obter um filamento cilíndrico com cerca de 3 mm de diâmetro.

O ensaio apenas é considerado válido quando o cilindro inicia a fissuração aos 3 mm de diâmetro. Caso a fissuração se inicie quando o cilindro tem um diâmetro superior adiciona-se mais água à mistura. Já se o cilindro com 3 mm de diâmetro não apresentar quaisquer sinais de fissuração, será necessário adicionar mais solo à mistura.

Os provetes que cumpriram a referida condição foram colocados em cápsulas de alumínio, tendo a sua massa sido medida de seguida. Posteriormente, as cápsulas foram colocadas numa estufa até a sua massa ter uma variação inferior a 0,1% entre medições sucessivas. Foi registado a massa seca dos provetes.

O teor de humidade dos provetes foi calculado pelo quociente entre a sua massa de água e a sua massa seca. O limite de plasticidade do solo corresponde ao valor médio dos teores de humidade dos quatro provetes do mesmo.

Para o RCD não foi possível realizar este ensaio pois o mesmo é um solo não plástico.

Quadro 3.6 – Determinação do limite de plasticidade para o solo SB

Nº da Cápsula			1	2	3	4
<b>A</b>	Massa da cápsula + Toma húmida	(g)	6.41	5.90	11.16	5.35
<b>B</b>	Massa da cápsula + Toma seca	(g)	6.11	5.66	10.81	5.24
<b>C = A - B</b>	Massa de água na toma	(g)	0.24	0.35	0.11	0.23
<b>D</b>	Massa da cápsula	(g)	4.42	9.14	4.72	4.77
<b>E = B - D</b>	Massa da toma Seca	(g)	1.24	1.67	0.52	1.00
<b>W=100 x C/E</b>	Teor de humidade	(%)	19.35	20.96	21.15	23.00
LP - MÉDIA		(%)	20.37			

Quadro 3.7 – Determinação do limite de plasticidade para o solo SM

Nº da Cápsula			1	2	3	4
<b>A</b>	Massa da cápsula + Toma húmida	(g)	9.81	7.05	6.70	6.00
<b>B</b>	Massa da cápsula + Toma seca	(g)	9.53	6.64	6.31	5.77
<b>C = A - B</b>	Massa de água na toma	(g)	0.28	0.41	0.39	0.23
<b>D</b>	Massa da cápsula	(g)	8.13	4.67	4.63	4.77
<b>E = B - D</b>	Massa da toma Seca	(g)	1.40	1.97	1.68	1.00
<b>W=100 x C/E</b>	Teor de Humidade	(%)	20.00	20.81	23.21	23.00
LP - MÉDIA		(%)	21.76			

Após comparação com o Quadro 2.5, verifica-se que os dois solos estão dentro dos parâmetros recomendáveis.

Determinação do índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (3.1)$$

Este parâmetro consiste no intervalo de teores em água em que o solo apresenta um comportamento moldável. Com base neste valor é possível identificar o grau de plasticidade do solo, bem como a dimensão da gama de valores para os quais o material tem este comportamento. Para valores de IP entre 1 e 7 o material diz-se fracamente plástico; para valores entre 7 e 15, inclusive, o material apresenta comportamento medianamente plástico; no caso de valores superiores a 15, o material diz-se altamente plástico.

O solo SM apresenta IP= 5%, sendo classificado como fracamente plástico. O solo SB apresenta IP= 2%, sendo também classificado como fracamente plástico.

Após comparação com o Quadro 2.5, verifica-se que os dois solos estão fora do intervalo tanto dos parâmetros recomendados, bem como dos valores minimamente aceitáveis.

Em relação ao Quadro 2.6 o Solo SM define-se como Fraca a sua plasticidade.

O Quadro 2.7 define os dois solos SM, e SB, como pouco reactivos

**3.2.3. Classificação Unificada de solos**

Para classificar os solos que constituem os blocos em estudo recorreu-se à Classificação Unificada de Solos. Este tipo de classificação é realizada tendo por base a curva granulométrica e os limites de Attenberg, sendo os solos granulares classificados de acordo com a sua curva granulométrica e os solos finos classificados tendo em conta a sua plasticidade, por este parâmetro influenciar preponderantemente o seu comportamento destes solos. O solo é considerado granular quando a fracção fina não existe em proporção suficiente para influenciar o comportamento do solo.

A classificação divide, em primeira análise, os solos em dois grandes grupos: os solos grossos cuja percentagem retida no peneiro #200 da série ASTM é superior a 50%; e os solos finos, cuja percentagem retida no peneiro #200 da série ASTM é inferior a 50%. Os solos finos são ainda divididos em solos inorgânicos e orgânicos.

**3.2.4. Ensaio Proctor**

O ensaio Proctor consiste na compactação de uma amostra de solo num molde com a finalidade de determinar o teor em água e o peso volúmico seco do solo. A realização da compactação de amostras com diferentes quantidades de água adicionada permite a definição da

curva de compactação. Pela análise da curva é possível aferir o teor em água ótimo, isto é, o teor em água para o qual se obtém a baridade seca máxima.

O ensaio foi realizado segundo o procedimento definido na especificação E197 (LNEC, 1966).

A amostra de solo foi feita passar pelo peneiro #4 da série ASTM (malha com 4.76 mm) tendo sido rejeitada a fracção retida. Como a fracção retida foi inferior a 20%, o ensaio foi realizado em molde pequeno e com energia de compactação leve.

A especificação define que do material passado são retiradas pelo menos seis porções, cada uma com uma massa mínima de 2kg. Posteriormente é acrescentada a água necessária para que as diferenças dos teores de humidade entre provetes sejam de cerca de 2%. Na prática, para garantir diferenças do teor de humidade, foi utilizada sempre a mesma porção de solo à qual foi adicionada sempre a mesma quantidade de água. De referir, que após cada ensaio de compactação, retirou-se o provete do interior do molde, adicionou-se água e homogeneizou-se a mistura.

Em cada ensaio, a porção de solo foi inserida por camadas no interior do molde, sendo que entre cada camada foram aplicadas 25 pancadas de um pilão com uma massa de 2.49 kg a cair de uma altura de 30,5cm, representativo da energia de compactação leve.

O molde pequeno trata-se de um objecto cilíndrico, de aço, com diâmetro interior de 102mm e altura de 117mm. É composto por base e alonga. Após cada ensaio, isto é, após a compactação das três camadas da amostra, foi retirada a alonga, rasada a superfície do provete e medida a sua massa. Sendo conhecida a massa do molde e o volume interior, é possível calcular a baridade húmida do solo, resultado do quociente entre a massa do provete e o seu volume.

Para calcular o teor de humidade do provete, foi necessário retirar uma pequena amostra de solo do topo superior e do topo inferior do molde. Essas amostras foram colocadas em cápsulas de alumínio, a sua massa húmida foi medida e foram colocadas em estufa até a variação da sua massa entre medições consecutivas ser inferior a 0,1%. A massa seca foi registada. A massa de água na amostra resultou da diferença entre as massas húmida e seca e o teor de humidade foi calculado pelo quociente entre a massa de água e a massa seca do provete. Como o teor de humidade no topo do molde poderá apresentar diferenças do teor de humidade do solo na base do molde, calcularam-se os teores de humidade das amostras nas duas localizações e calculou-se o valor médio.

A baridade seca ( $\gamma_s$ ) do solo é calculada por aplicação da (3.1 que relaciona a baridade húmida ( $\gamma_w$ ) com o teor de humidade ( $W$ ) do solo.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w}{100 + W} \times 100 \quad (3.1)$$

Por análise da curva de compactação do solo SB (Figura 3.5), surgem dúvidas em relação ao tipo de solo, podendo tratar-se de uma areia siltosa ou de uma areia argilosa. Isto porque, para ser uma areia siltosa, a sua distribuição na curva deveria ser quase simétrica em relação ao teor em água ótimo (11.6%), o que não é evidente na presente curva. Por outro lado apresenta valores de teor de água baixos que são geralmente associados a comportamentos de areias siltosas. Os problemas

apresentados poderão ter sido motivados por vários factores, tais como; má divisão do solo inicialmente ou aplicação não constante da força durante a compactação.

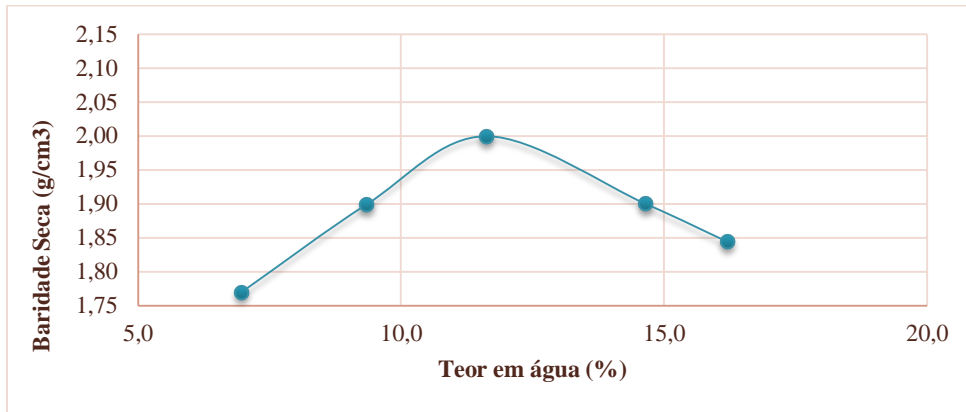


Figura 3.5 – Ensaio Proctor para Solo SB

No entanto, ao comparar os resultados do ensaio Proctor com o resultado da análise granulométrica realizada ao mesmo solo, confirma-se que se trata de uma areia siltosa.

No que respeita ao solo SM (Figura 3.6), apesar da curva de compactação apresentar uma configuração diferente da curva do solo SB, é possível verificar que este tem um teor de água óptimo superior, o que indicia que o solo tenha uma componente argilosa superior, tal como já foi verificado na análise granulométrica.

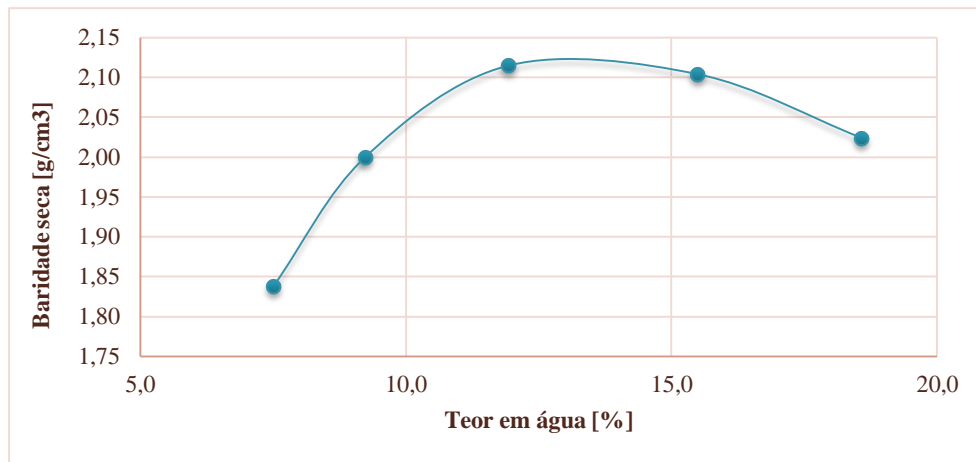


Figura 3.6 – Ensaio Proctor para Solo SM

## 4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS E RESULTADOS

### 4.1 Descrição geral

Neste capítulo são apresentados todos os ensaios realizados aos blocos, sendo que, para cada um, se expõem, caso existam:

- Os procedimentos dos ensaios preliminares e resultados;
- Os ensaios escolhidos e seus procedimentos definitivos;
- Os resultados do ensaio escolhido;

A comparação entre os resultados dos ensaios preliminares e dos escolhidos.

A Figura 4.1 apresenta um organograma com os ensaios realizados aos blocos. Estes são divididos entre não destrutivos, realizados em primeiro lugar, e destrutivos, realizados posteriormente.

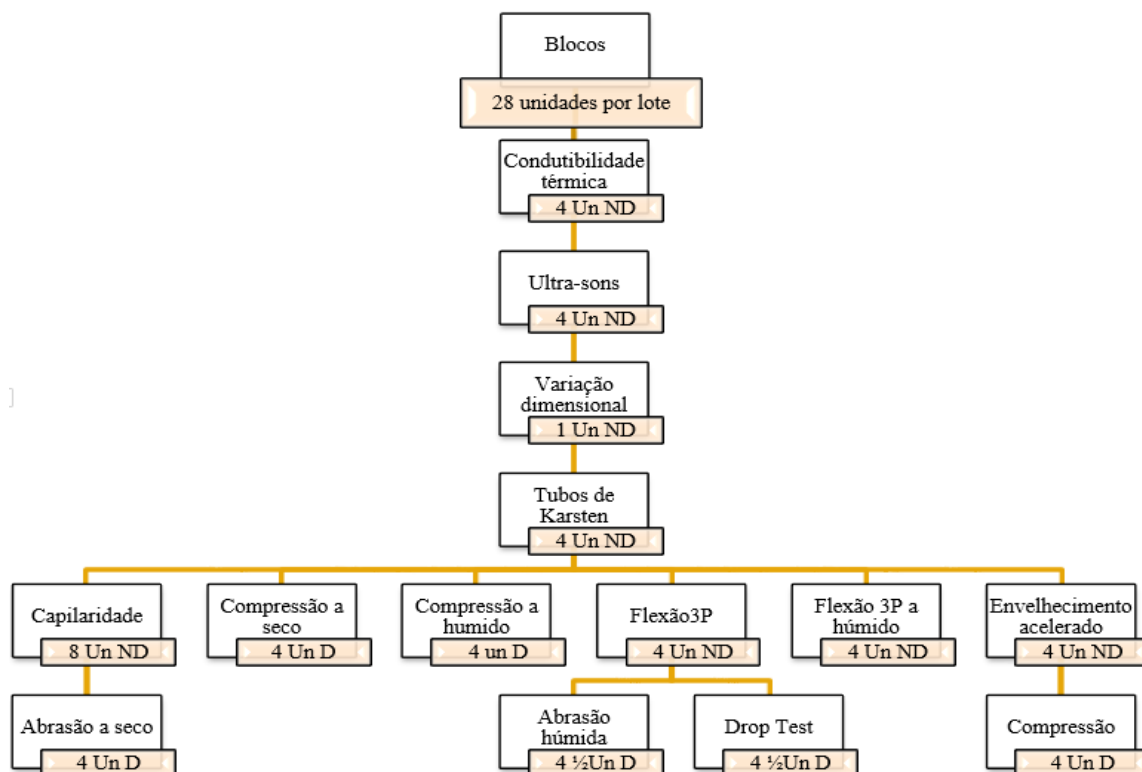


Figura 4.1 – Organograma relativo aos ensaios realizados aos blocos; ND – Não destrutivo, D - Destrutivo

De seguida, serão apresentados os ensaios realizados.

## 4.2 Condutibilidade térmica ( $\lambda$ )

### Descrição

A condutibilidade térmica representa a maior ou menor facilidade com que o calor atravessa os materiais, ou seja, pelo ensaio de condutibilidade térmica afere-se a resistência que o material oferece à transferência da energia sobre a forma de condução.

Este trata-se de um ensaio não destrutivo em que foram analisados 4 blocos de cada lote. Foi analisada a condutibilidade térmica em duas faces dos blocos, sendo que em cada face foram analisados dois pontos, como demonstra a figura 4.2. O ensaio foi realizado com recurso ao equipamento *Heat Transfer Analyzer*, model 2104 da ISOMET e no interior de uma sala climatizada do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL, com condições de HR e temperatura controladas de, respectivamente,  $65\pm 5\%$  e  $20\pm 2^\circ\text{C}$ . É importante referir que os blocos já estavam na sala há tempo suficiente para se encontrarem em condições de equilíbrio com a mesma.

O aparelho é composto por uma célula que é colocada sobre o bloco e promove uma emissão de calor, quantificando também a quantidade de calor recebida no mesmo ponto. O valor da condutibilidade térmica corresponde à diferença entre a quantidade de calor emitida e a recebida. De notar que quanto maior a diferença entre esses dois valores, maior é o valor de  $\lambda$ , ou seja, mais energia se dissipa para o bloco.

Durante a realização do ensaio os blocos foram colocados sobre uma placa de XPS para evitar a transmissão de energia do bloco para a superfície da mesa.

A célula de contacto utilizada para o ensaio é indicada para medir valores de  $\lambda$  situados entre 0,3 e 2,0 [W/m.°C].

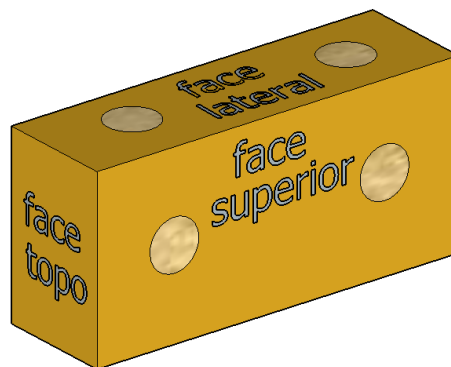


Figura 4.2 – Pontos de contacto nas medições da condutibilidade térmica

### Procedimento de ensaio

- Colocou-se o bloco sobre a placa de XPS;
- Colocou-se a célula sobre a face lateral no primeiro ponto de análise, ligou-se o aparelho e registou-se o valor de  $\lambda$  fornecido; (Figura 4.2)

- Colocou-se a célula sobre o segundo ponto de análise na mesma face e repetiu-se o processo;
- Rodou-se o bloco para ficar com a face superior virada para cima e colocou-se a célula sobre cada um dos pontos pré-definidos registando-se os valores obtidos (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Medição de um valor de condutibilidade térmica

**Resultados**

Uma vez que o aparelho utilizado apresenta imediatamente os valores de  $\lambda$ , no tratamento de resultados foi feita uma média aritmética e calculado o desvio padrão dos pontos nas duas faces analisadas e para os quatro blocos analisados (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Valores médios e desvios-padrão da condutibilidade térmica

Lote	Face superior [w/m.°C]		Face lateral [w/m.°C]		Média lote [w/m.°C]	D. P. Lote [w/m.°C]
	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.		
TC	0.840	0.035	1.004	0.071	0.922	0.101
TB	0.437	0.026	0.480	0.027	0.458	0.034
C	0.907	0.041	0.738	0.052	0.822	0.098
E	0.516	0.022	0.522	0.017	0.519	0.019
B	0.960	0.035	1.038	0.032	0.999	0.051

Os resultados obtidos foram introduzidos num gráfico de barras, Figura 4.4.

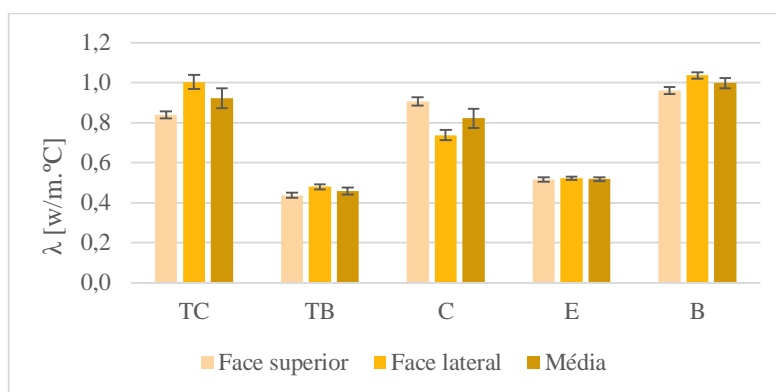


Figura 4.4 – Condutibilidade térmica dos blocos em estudo (valor médio e desvio padrão)

De acordo com a Figura 4.4, verifica-se que o Lote TB tem valores de condutibilidade térmica de cerca de metade comparado com o lote TC, o que indica que o produto cerâmico é melhor isolante

térmico que o produto crú. Verifica-se que também entre os dois lotes de BTC (E e B), existe uma grande diferença de valores.

Em relação às diferenças de valor das faces laterais e superiores, nos blocos do lote TC, TB e B, verifica-se que as faces laterais transmitem mais energia que as superiores, enquanto no C se verifica o inverso. Nos blocos do mesmo lote não se verificam diferenças significativas.

### 4.3 Velocidade de propagação de ultra-sons

#### Descrição

O ensaio de ultra-sons permite estimar várias características do material tais como o módulo de elasticidade dinâmico, homogeneidade, resistências mecânicas e a presença de fendilhações. Trata-se de um ensaio não destrutivo que consiste na determinação do tempo que as ondas ultra-sónicas demoram a percorrer a distância entre o transdutor emissor até ao receptor. Conhecendo o tempo de propagação e a distância entre os pontos de aplicação dos transdutores é calculada a velocidade de propagação.

De referir que quanto maior a velocidade de propagação mais compacto é o material. Diferenças significativas entre velocidades de propagação entre vários pontos num mesmo bloco indiciam que poderão existir problemas de compacidade, fendilhações e/ou má homogeneização do material.

O ultra-som é um som com uma frequência superior à que o ouvido do ser humano consegue captar, ou seja, com frequências superiores a 20 kHz.

Foi utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultraconic Non-destructive Digital Indicating Tester*) LAB da PROCEQ, que emite um impulso eléctrico de baixa frequência ultra-sónica.

Utilizou-se um transdutor emissor cónico de 54kHz. O equipamento foi sintonizado em modo automático, variando o sinal emitido entre os valores de 125V e 500V para a tensão de excitação e entre 1 vez e 100 vezes a amplificação de sinal. Neste modo, o aparelho emite vários valores de sinal de forma a procurar qual o sinal de qualidade superior.

O equipamento fornece o tempo (em micro segundos) que a onda ultra-sónica demora a percorrer a distância entre os pontos onde aplicados os transdutores emissor e receptor.

#### Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo o método directo e semidirecto como indica a planificação de pontos apresentado na figura 4.5, tendo sido feitas as leituras da seguinte forma:

- Marcaram-se os blocos com os pontos desde o A até ao H (Figura 4.5);
- Colocou-se gel condutor em cada ponto assinalado;
- Colocou-se o transdutor emissor no ponto A e de seguida o receptor percorreu desde o ponto B até ao ponto H, tendo sido efectuadas as seguintes leituras: AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH;

- De seguida, colocou-se o transdutor emissor no ponto H e o receptor percorreu os pontos desde o G até ao A por esta ordem, tendo-se obtido as seguintes leituras: HG, HF, HE, HD, HC, HB, HÁ.

Na figura 4.6 mostra-se um exemplo de medição de valores.

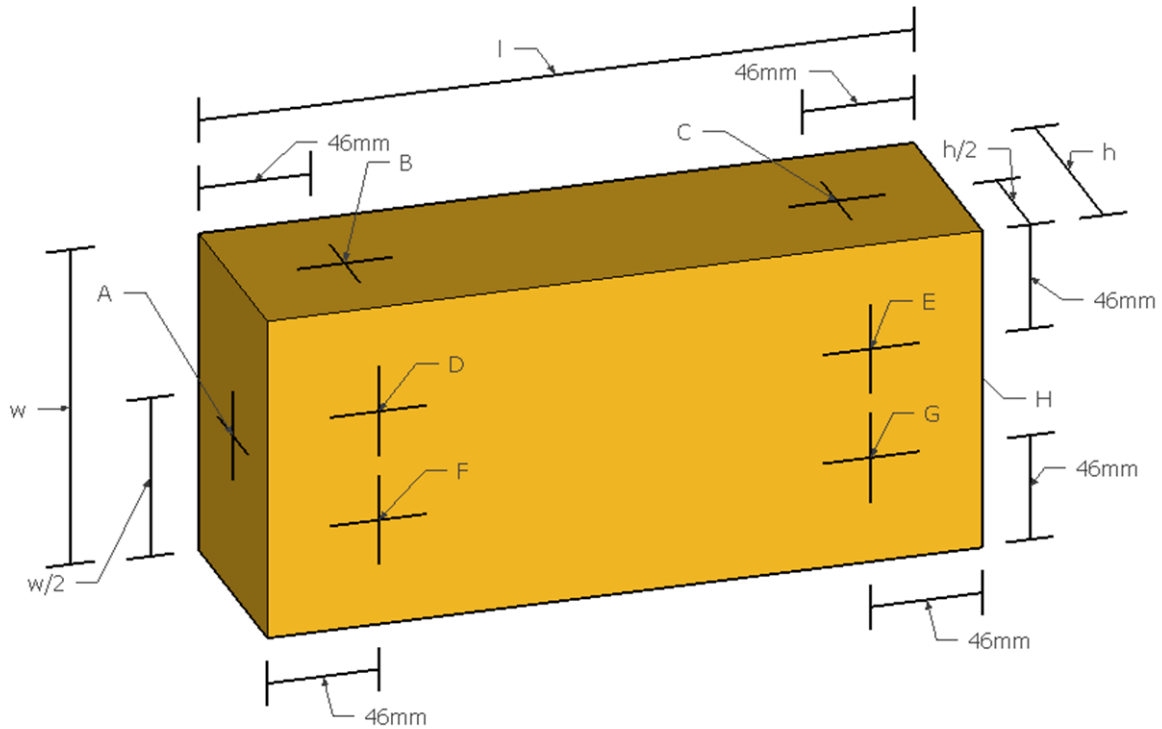


Figura 4.5 – Posicionamento dos pontos em análise



Figura 4.6 – Medição de valor dos ultra-sons e aparelho de leitura

### Tratamento de resultados

A velocidade de propagação dos ultra-sons resultou do quociente da distância entre cada conjunto de pontos analisados e o tempo que o ultra-som o demorou a atravessar. Posteriormente foi calculada uma velocidade média e o respectivo desvio padrão para cada bloco. Como foram analisados 4 blocos de cada lote então também é apresentado o valor médio para o lote.

Apresentação e análise de resultados

No Quadro 4.2 é apresentada a compilação da velocidade média de propagação de ultra-sons para cada lote de blocos e o respectivo desvio padrão. Os resultados obtidos foram introduzidos num gráfico de barras apresentado na Figura 4.7.

Quadro 4.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons

Lote	Velocidade [m/s]	
	Média	Desvio P.
TC	1133.8	229.8
TB	708.7	160.1
C	996.9	180.5
E	884.1	105.7
B	1142.0	228.7

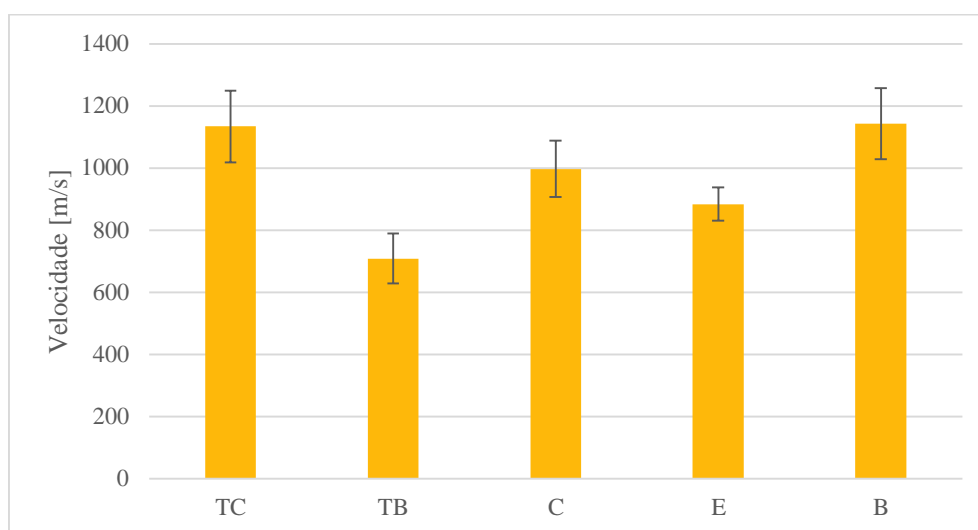


Figura 4.7 – Valores de velocidade de propagação de ultra-sons (valor médio e desvio padrão)

Após análise da Figura 4.7 é perceptível uma redução dos valores de velocidade de propagação de ultra-sons do lote TC para o lote TB, o lote C tem valores semelhantes ao lote TC. O lote E tem valores inferiores aos do lote B.

De referir que após o lote TC ser cozido, é visível a olho nu o aumento substancial de vazios, o que pode explicar o menor valor de velocidade de propagação de ultrasons. Importante relebrar ao leitor que os blocos B, foram fabricados com uma prensa hidráulica, e para os blocos E foi utilizada uma prensa manual, o que originou menores pressões de confinamento.

#### 4.4 Absorção de água sob baixa pressão (tubos de *Karsten*)

##### Descrição

O ensaio dos tubos de Karsten tem a finalidade de avaliar a capacidade do material absorver água a baixa pressão durante um certo período de tempo. Este ensaio tenta simular a acção da água combinada com o vento e determinar a quantidade de água absorvida durante o tempo pré-definido numa área específica.

O ensaio foi realizado na face lateral dos blocos com recurso a tubos de Karsten para superfícies horizontais, devido a dificuldades de fixação dos tubos para superfícies verticais ao suporte. Em cada bloco foram fixados dois tubos de *Karsten*, tendo o ensaio decorrido quase em simultâneo nos dois tubos.

Na figura 4.8 apresentam-se os dois tipos de tubos de Karsten, os destinados a fixação em superfícies verticais e os destinados a superfícies horizontais, que foram os utilizados na presente análise.

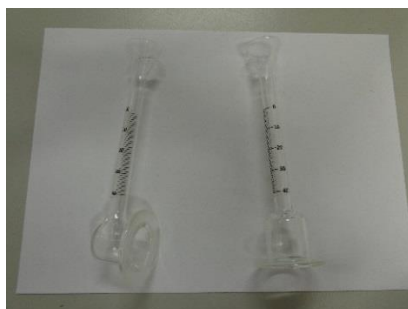


Figura 4.8 – Tubos de Karsten

Os blocos antes do ensaio estavam armazenados em sala climatizada do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL com condições de humidade relativa e temperatura constantes de, respectivamente,  $65\pm 5\%$  e  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Foi realizado um ensaio preliminar para conhecer qual o tempo médio de absorção de cada mililitro de água pelo bloco.

##### **4.4.1. Ensaio preliminar**

Para a realização deste ensaio foi escolhido um bloco ao acaso, neste caso o bloco E10, no qual foram colocados dois tubos de *Karsten* na face lateral, apesar de apenas um desses ter sido utilizado, como demonstra a figura 4.9.

##### Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio adoptado foi o seguinte:

- Mediram-se os diâmetros interiores das aberturas dos tubos de *Karsten* em duas direcções perpendiculares;
- Posicionou-se o bloco de forma a ficar com uma das faces laterais virada para cima;

- Colocou-se plasticina no bordo em redor à abertura do tubo de seguida pressionou-se a mesma contra o suporte, tendo o cuidado de não obstruir a área de contacto da água com o bloco, repetiu-se este passo para o segundo tubo;
- Colocou-se mais plasticina em redor dos tubos para garantir uma melhor estanquicidade;
- Encheu-se o primeiro tubo até à marca dos 0 cm<sup>3</sup> e accionou-se o cronómetro;
- A cada centímetro cubico de água absorvida foi registado o tempo decorrido desde o início do ensaio.
- Repôs-se o nível de água na marca do 0 cm<sup>3</sup> sempre que o tubo atingiu a marca dos 4 cm<sup>3</sup>;
- O ensaio decorreu durante 60 minutos. Com os registos de tempo a que ocorreu cada medição, foi possível, pelo diferencial de tempo entre medições, calcular o tempo de absorção de cada centímetro cúbico de água.

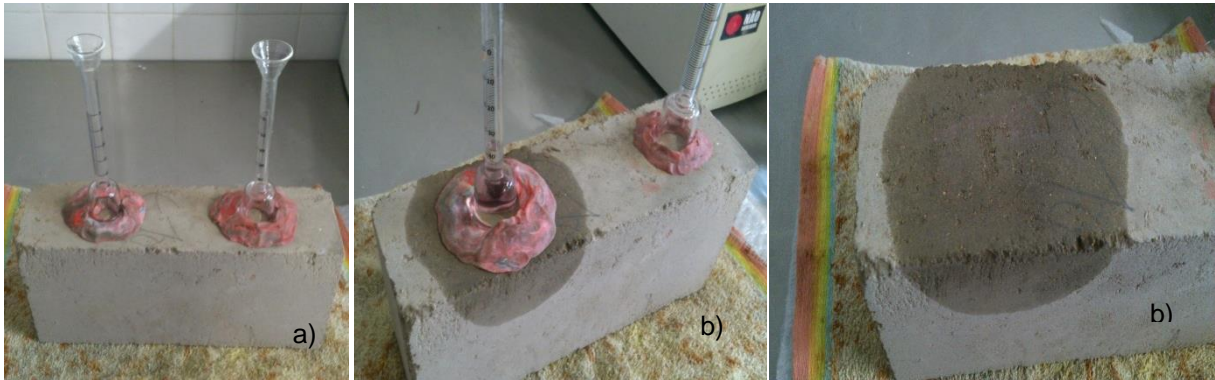


Figura 4.9 – Bloco E10 a) antes do ensaio e b) depois do ensaio

### Tratamento de dados

Foi calculado o coeficiente de absorção para todas as leituras realizadas durante o ensaio utilizando a (4.1) (Abreu, 2013)

$$C_{absorção}^t = \frac{m_{abs} \times 10^{-3}}{\frac{\pi \times d^2}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}} \quad (4.1)$$

Em que,

- $C_{absorção}$  – Coeficiente de absorção na leitura ao tempo t [kg/m<sup>2</sup>·min<sup>0,5</sup>]
- $m_{abs}$  – Massa de água absorvida [g]
- $d$  – Valor médio do diâmetro da abertura inferior do tubo de Karsten [mm]
- $t$  – Intervalo de tempo correspondente ao coeficiente calculado

Resultados e conclusões

Na Figura 4.10 é apresentada a evolução da quantidade de água absorvida pelo bloco em função do tempo e na Figura 4.11 é apresentada a evolução da quantidade de água absorvida em função da raiz quadrada do tempo.

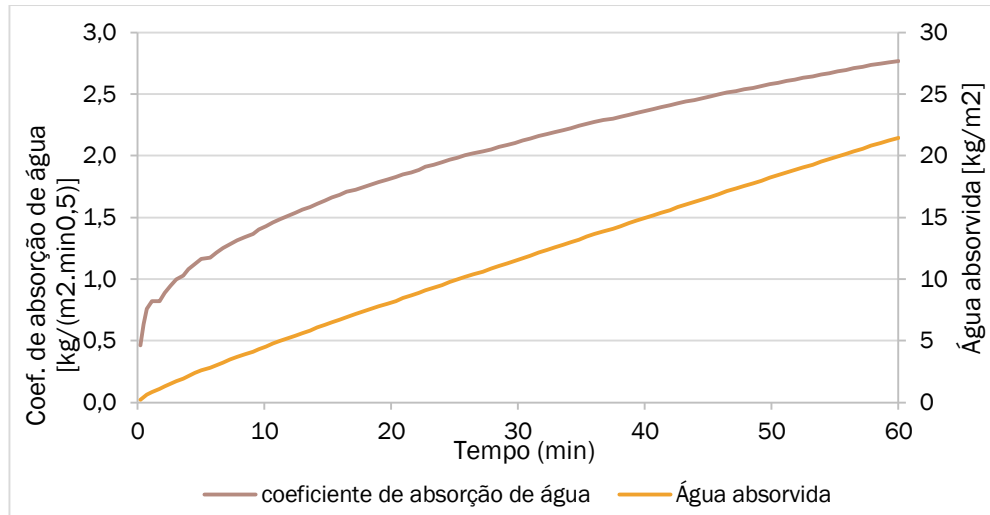


Figura 4.10 – Quantidade de água absorvida e coeficiente de absorção de água em função do tempo em minutos

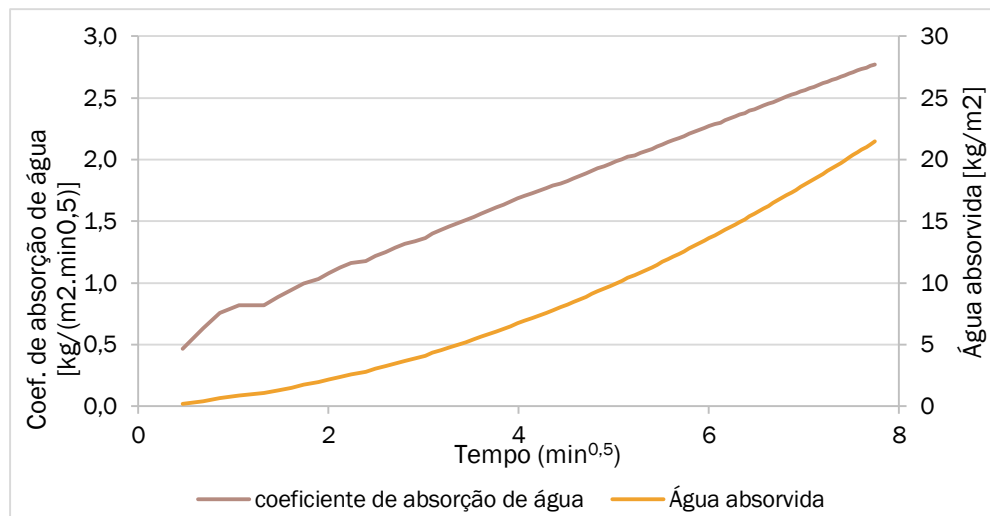


Figura 4.11 – Quantidade de água absorvida e coeficiente de absorção de água em função da raiz do tempo

Neste ensaio preliminar o bloco E10 absorveu 99cm<sup>3</sup> de água em 60 minutos de ensaio. Após a conclusão do ensaio, as faces do bloco localizadas junto à abertura do tubo apresentaram-se muito húmidas, como demonstra a figura 4.9, existindo uma distribuição radial das zonas húmidas.

No Quadro 4.3 são apresentados os coeficientes de absorção de água após absorção dos primeiros 4 ml (4cm<sup>3</sup>) de água e após 5, 10, 15, 30 e 60 minutos de ensaio.

Quadro 4.3– Quadro resumo dos coeficientes de absorção de água

Coeficiente de absorção de água [kg/(m <sup>2</sup> *min <sup>0.5</sup> )]	
4ml	0.820
5min	1.163
10min	1.430
15min	1.635
30min	2.104
60min	2.770

Na Figura 4.12 é apresentado o tempo entre medições em função da quantidade de água absorvida pelos blocos.

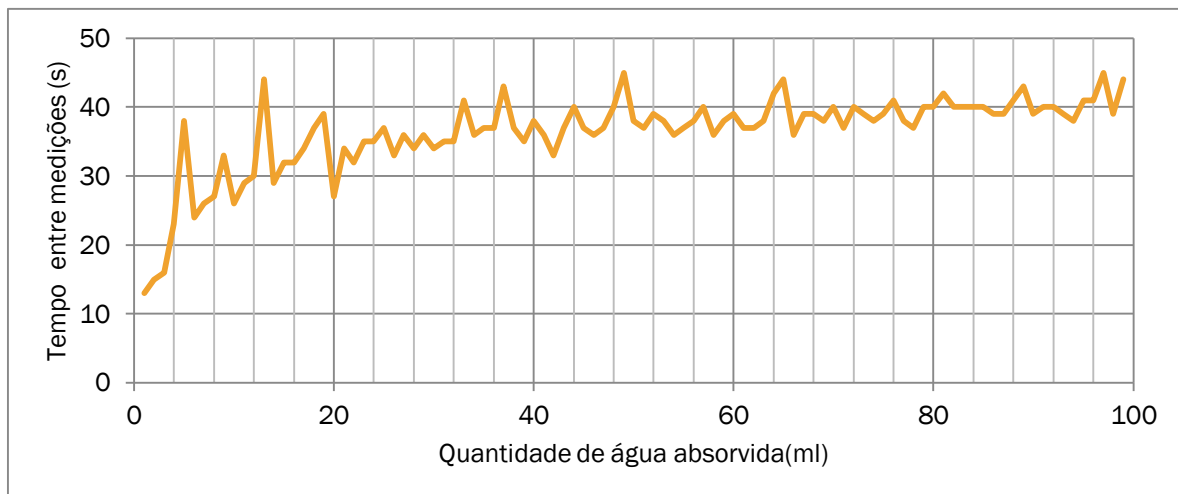


Figura 4.12 – Tempo entre medições e quantidade de água adicionada

Tendo em consideração os resultados do ensaio preliminar, considerou-se que 60 minutos de ensaio poderia ser demasiado tempo nesta situação, uma vez que se torna visível ao fim de pouco tempo de ensaio o aumento do diâmetro de água absorvida na superfície do bloco. Assim sendo, devido à possibilidade da evaporação dessa água condicionar o ensaio e os resultados, optou-se por adaptar o ensaio a uma duração de 30 minutos.

De notar que após cada linha vertical de 4ml existe frequentemente um pico no gráfico, que corresponde ao momento em que se enche o tubo e talvez se domore um pouco mais do que o necessário. (Figura 4.12)

#### 4.4.2. Ensaio escolhido

Tal como referido anteriormente, a diferença entre o procedimento definido para o ensaio, e apresentado no capítulo anterior, e o procedimento efectivamente praticado no presente estudo é a redução do tempo de ensaio, dos 60 minutos para 30 minutos.

O ensaio foi realizado sobre 4 blocos de cada lote (Figura 4.13)

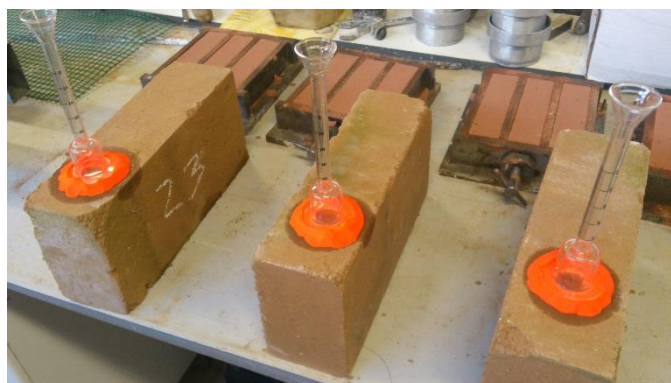


Figura 4.13 – Ensaio a 3 blocos do lote B

Resultados e conclusões

Quadro 4.4 – Resultados do ensaio de tubos de karsten

Lote		Coef [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]					
		4 ml	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min
TC	Média	-	0	0.01	0.01	0.01	0.02
	D.P.	-	0	0.02	0.02	0.02	0.01
TB	Média	0.38	0	0.43	0.49	0.55	0.69
	D.P.	0.15	0	0.30	0.26	0.27	0.33
C	Média	-	0	0.01	0.01	0.01	0.02
	D.P.	-	0	0.02	0.02	0.02	0.01
B	Média	0.37	0	0.36	0.41	0.44	0.54
	D.P.	0.09	0	0.11	0.13	0.14	0.16
E	Média	1.08	0	1.90	2.20	2.60	3.04
	D.P.	0.15	0	0.54	0.53	0.63	0.72

No quadro 4.5 são apresentados os resultados do ensaio e para melhor se entender, foi construído um gráfico com os valores. (Figura 4.14).

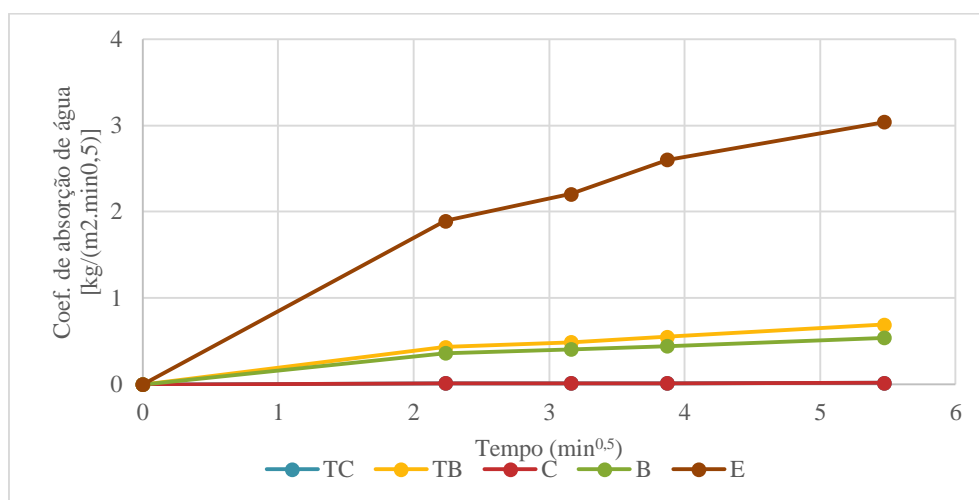


Figura 4.14 – Resultados do ensaio de tubos de karsten

O lote C e TC têm valores quase nulos de coeficiente de absorção de água, os blocos B e TB têm valores muito próximos entre si, e os blocos E é os que têm os valores mais elevados dos restantes.

#### 4.5 Absorção de água por capilaridade

##### Descrição

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem a finalidade de estudar o comportamento dos blocos face à ascensão de água por capilaridade. Através da medição da quantidade de água absorvida em função do tempo de ensaio é possível determinar o coeficiente de capilaridade (CC), que representa a velocidade de absorção de água no início do ensaio e também o valor assintótico (VA) que representa a quantidade máxima de água absorvida pelo bloco.

O ensaio foi realizado com base no descrito nas normas europeias EN 15801:2009 [CEN, 2009] e EN 1015-18:2002 [CEN, 2002]. Utilizaram-se blocos que foram colocados em ensaio após permanência em estufa a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  durante as 24h que antecederam o início do ensaio. Os provetes foram ensaiados com as suas dimensões originais.

As faces laterais dos blocos foram envoltas em película de polietileno, como demonstra a Figura 4.15, de forma a garantir a ocorrência de absorção de água apenas pela base dos provetes.



Figura 4.15 – Ensaio preliminar ao bloco do lote B

Realizou-se um ensaio preliminar em que foi testado apenas um bloco escolhido ao acaso. Esse bloco foi totalmente envolvido por um tecido de licra fina de forma a evitar perdas de massa, quer devido ao manuseamento, quer devido à acção da água que poderia dissolver a terra, ou em último caso por combinação das duas acções.

Após o ensaio, precedeu-se a uma inspecção visual do tabuleiro em que foi realizado o ensaio e constatou-se que existia uma perda de massa considerável. Este facto deveu-se ao rompimento da rede devido ao manuseamento do bloco para proceder às pesagens. Assim, de forma a minimizar as perdas de massa foi decidido introduzir os blocos dentro de cestos de rede metálica com dimensões um pouco superiores às dos blocos. (Figura 4.16)

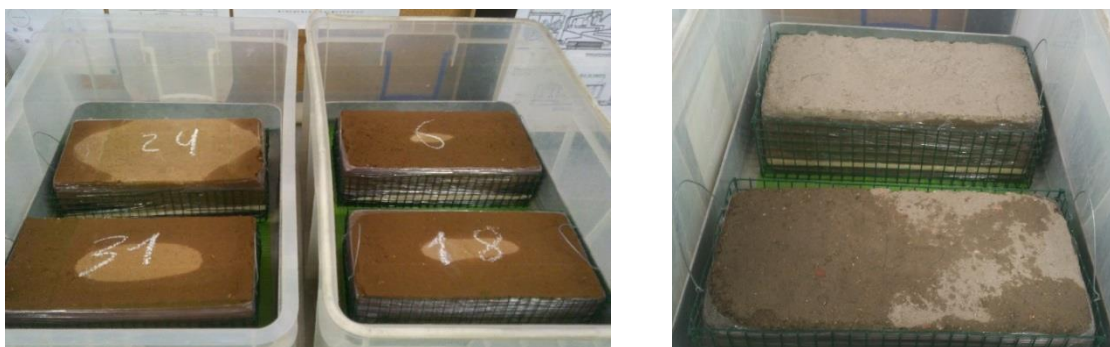


Figura 4.16 – Blocos durante o ensaio de capilaridade

### Procedimento de ensaio

O ensaio foi desenvolvido segundo o seguinte procedimento:

- As faces laterais dos provetes foram envolvidas com película aderente. Este processo, no caso dos provetes S, apenas foi efectuado após arrefecimento dos mesmos. Teve-se em atenção o topo e a base dos provetes durante a aplicação da película de forma a evitar obstruí-los.

- Utilizaram-se caixas de plástico onde foi colocada uma massa de água de forma a criar um ambiente com elevada HR. As caixas utilizadas tinham tampas que eram mantidas fechadas sempre que possível para não se perderem tais condições de humidade e evitar a evaporação da água.

- No interior das caixas foram colocados tabuleiros metálicos, tendo o cuidado de os deixar nivelados para que a altura de água em contacto com os blocos fosse igual em todos os pontos.

- Colocou-se uma lâmina de água com altura de 5mm medidos a partir do cesto de rede que envolve os provetes. Devido ao cesto de rede utilizado, a água circula sem impedimentos sob os provetes.

- No início do ensaio foram medidas as massas secas dos provetes, registando também as massas dos cestos de rede onde foram inseridos os provetes.

- De seguida os provetes foram colocados no interior da caixa de ensaio em contacto com a lâmina de água, tendo sido iniciada a contagem do tempo nesse instante.

- Mediram-se as massas dos blocos 5, 10, 15, 30 minutos e 1 hora após a sua colocação na caixa. A partir desse momento as medições foram efectuadas de hora em hora até os provetes estarem próximos da saturação. Posteriormente, mediram-se as massas 24 horas após o início do ensaio e este é dado por terminado nesse momento.

- Durante o ensaio, principalmente nos primeiros minutos e horas em que os provetes absorvem uma grande quantidade de água, foi-se controlando a altura da lâmina de água com recurso a uma régua metálica. Sempre que necessário adicionou-se mais água de forma a manter a lâmina de água com altura constante. Teve-se o cuidado de não molhar os provetes.

Tratamento de resultados

Após a conclusão do ensaio de absorção foram traçadas curvas de absorção capilar que relacionam a quantidade de água absorvida com o tempo de ensaio. A quantidade de água absorvida até um dado instante foi calculada pelo quociente entre a massa de água absorvida (diferença entre a massa do provete nesse instante e a massa inicial do provete) pela área de absorção correspondente à área da base dos provetes.

O CC foi obtido pelo cálculo do declive do troço recto das curvas de absorção. O parâmetro CC é um indicador da velocidade de absorção. Dado um maior CC corresponde a um maior declive do troço recto das curvas de absorção o que significa que corresponde a uma absorção de água mais rápida.

O VA é obtido pelo cálculo da quantidade de água absorvida até à conclusão do ensaio. Por comparação deste parâmetro entre blocos é possível conhecer o bloco que absorve mais água.

Os valores finais de CC e VA para cada lote de blocos correspondeu ao valor médio entre os resultados obtidos para cada bloco (Quadro 4.6).

Apresentação de resultados

Quadro 4.5 – Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico

Lote	C.C. [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ ]		V.A. [ $\text{kg/m}^2$ ]	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
TC	1.07	0.03	15.29	0.73
TB	0.96	0.13	16.08	1.07
C	0.72	0.09	18.74	1.21
E	3.74	0.20	26.08	0.62
B	1.14	0.08	18.51	0.59

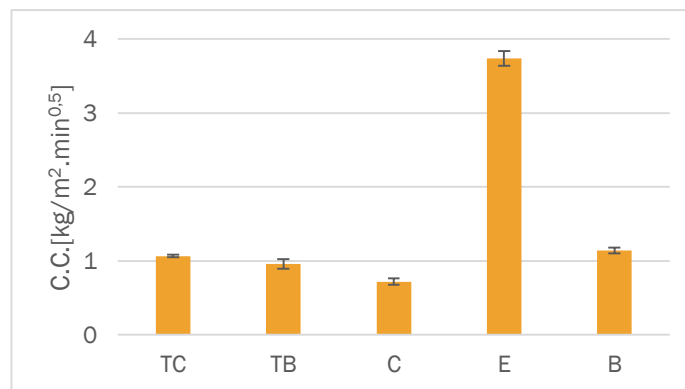


Figura 4.17 – Coeficientes de capilaridade dos blocos

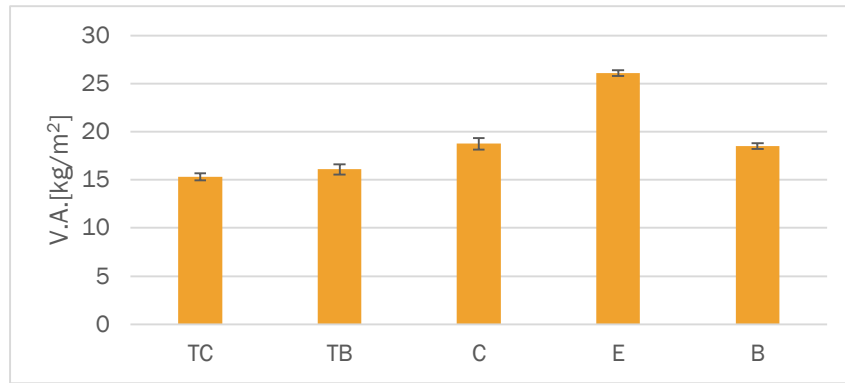


Figura 4.18 – Valores assintóticos dos blocos

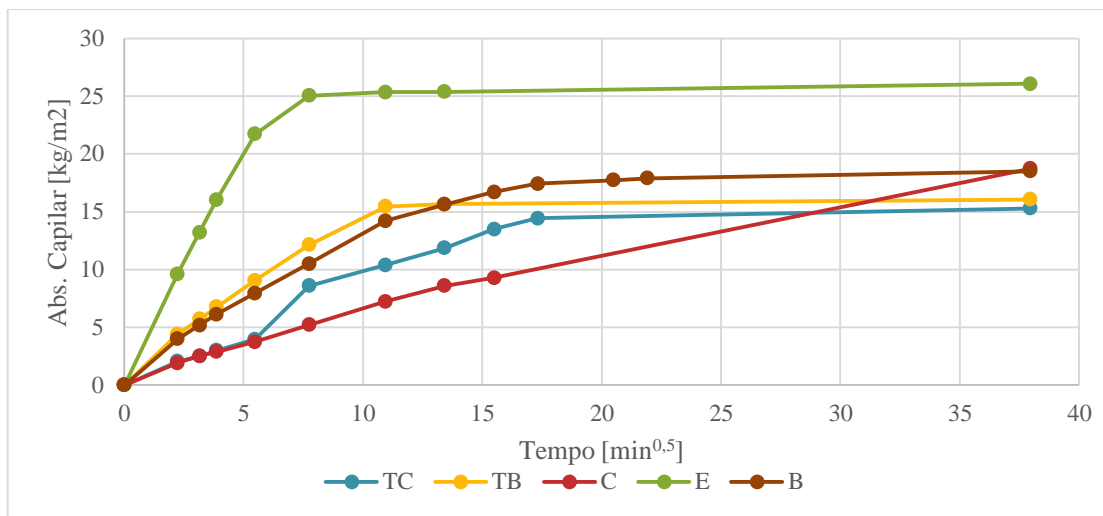


Figura 4.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade

Os blocos do lote E apresentam um comportamento bastante díspar dos demais, sendo que exibem um valor de coeficiente de capilaridade cerca de 3 a 4 superior a todos os outros blocos; o valor assintótico também é superior aos restantes. Estes blocos estabilizaram a absorção capilar mais cedo que os restantes (Figura 4.17 e Figura 4.18).

Os blocos do lote C apresentam um declive quase constante durante toda a execução do ensaio não se tendo conseguido atingir o valor correcto de valor assintótico neste caso (Figura 4.19).

## 4.6 Resistência à Compressão

A resistência à compressão a seco é um parâmetro usualmente estudado na caracterização de qualquer material construtivo, no entanto, no caso de caracterização dos blocos em estudo é um factor de elevada importância uma vez que tais blocos poderão ser utilizados em construção autoportante (Gomes, 2013).

De forma a melhor simular a resistência dos blocos quando assentes a formar uma alvenaria, os blocos foram cortados ao meio e as duas metades foram assentes com argamassas previamente preparadas, com recurso a uma massa do solo utilizado na concepção dos blocos, e analisadas.

O ensaio de resistência à compressão processa-se por carregamento do material até à ruptura.

Os exemplares foram carregados nas direcções em que vão ser aplicados em obra, isto é, com a face inferior para baixo, aplicando uma carga a velocidade constante, ou seja, definindo uma velocidade para o deslocamento dos pratos da prensa.

Para que os pratos da prensa tivessem um contacto homogéneo com os blocos desbastou-se as faces dos blocos, sempre que necessário, com recurso a um disco de desbaste para betão. Este procedimento foi apenas necessário para os lotes C, TC e TB. Para os 2 lotes de BTC não se justificou este procedimento.

O ensaio foi conduzido com base na norma NBR 8492 (ABNT, 2012), na norma NP EN 772-1:2012 (IPQ, 2012) e segundo o referido por Morel (2002). Esta norma refere que os blocos antes de ensaiados devem ser imersos em água para atingirem a saturação. Neste caso efectuaram-se ensaios a quatro blocos de cada lote em estado seco (sem imersão) e a quatro blocos de cada lote em estado húmido (com imersão).

#### **4.6.1. Ensaio preliminar**

##### Descrição

Para a escolha da argamassa a adoptar no assentamento dos blocos foram testadas diversas argamassas pré-definidas com o mesmo ligante utilizado para a estabilização dos blocos. Foram realizados ensaios de compressão às argamassas.

Apenas os lotes E e B foram estabilizados com ligantes. Nos remanescentes lotes, não foi utilizado qualquer ligante.

Nos blocos do lote E utilizou-se uma argamassa de cal hidráulica natural (NHL3.5) produzida pela Secil, devido ao facto dos blocos do solo E terem sido estabilizados com cal hidráulica da Secil (HL5), numa proporção de ligante/solo de 6.25% em massa.

Nos blocos do lote B utilizou-se também a argamassa de cal hidráulica natural NHL 3.5, uma vez que o lote B foi estabilizado com cal aérea (CL) e cimento (Cem) numa proporção de ligante/solo de 5% e 1,7% em massa respectivamente. A utilização de NHL3.5 justifica-se por esta cal apresentar propriedades hidráulicas como o cimento, e características próximas da cal aérea.

Nos blocos do lote C, devido ao facto de não terem sido estabilizados com ligantes, foi apenas utilizada uma argamassa de terra como elemento de ligação.

Inicialmente, foi colocada a hipótese de adoptar argamassas-padrão, pelo que foram avaliadas as propriedades de argamassas constituídas por areia de rio, como agregado, e dois tipos se de ligantes CL e NHL3.5, com os traços volumétricos de 1:2 e 1:3 para CL e 1:3 e 1:4 para NHL. No Quadro 4.6 são apresentadas as quantidades de ligante, agregado e água utilizados em cada mistura. A quantidade de água adicionada foi a necessária para se ter a trabalhabilidade adequada para ser aplicada nos blocos.

Para cada tipo de argamassa foram realizados três provetes com as dimensões 4x4x16 (cm) e realizados ensaios às 48 horas e aos 7 dias de idade.

Quadro 4.6 – Volumes dos constituintes das argamassas

Classificação da argamassa	Quantidade de agregado [cm <sup>3</sup> ]	Quantidade de ligante [cm <sup>3</sup> ]	Quantidade de água [cm <sup>3</sup> ]
1:2 CL	836	418	350
1:3 CL	940.5	313.5	325
1:3 NHL	940.5	313.5	280
1:4 NHL	836	209	250

O ensaio foi realizado com base no procedimento definido pela norma EN 1015-11:1999 e utilizando a máquina de tracção universal “ZWICK Z050”, com uma célula de carga de 50kN. Os três provetes foram partidos ao meio manualmente e foi ensaiada uma das metades de cada provete às 48 horas e a outra metade aos 7 dias de idade.

O ensaio de compressão consistiu na aplicação de um carregamento a velocidade constante (0,2mm/s), numa área de 4x4 cm<sup>2</sup>, até ocorrer rotura do provete. O *software* do equipamento traça um gráfico força-deslocamento que permite identificar com facilidade o momento em que ocorre a rotura e obter o valor da carga última de ruptura, correspondente ao valor máximo de de força aplicada no provete.

Numa fase mais avançada do estudo, foi avaliada a possibilidade de se utilizar os solos constituintes dos blocos, solos de Badajoz e de Montemor, em substituição do agregado definido inicialmente, a areia de rio. Nesta situação voltaram a formular-se argamassas apenas adoptando como ligante NHL3.5 com traços volumétricos de 1:4 e 1:5, como apresentado no Quadro 4.7, onde estão indicadas as quantidades dos elementos constituintes das argamassas. Uma vez mais, foram realizados ensaios de compressão às 48 horas e aos 7 dias de idade das argamassas.

Foi ainda constituída uma argamassa apenas composta por solo de Évora e água e analisada a sua resistência à compressão, a quantidade de água adicionada foi a suficiente para se conseguir uma boa trabalhabilidade. Uma vez que a argamassa já se encontrava em estado húmido não foi possível determinar qual a quantidade de água que foi adicionada.

Quadro 4.7 – Quantidades de material utilizado nas segundas argamassas

Classificação da argamassa	Localização do solo	Quantidade agregado [cm <sup>3</sup> ]	Quantidade de ligante [cm <sup>3</sup> ]	Quantidade de água [cm <sup>3</sup> ]
1:4 NHL 3,5	Montemor	836	209	340
1:5 NHL 3,5		1045	209	400
1:4 NHL 3,5	Badajoz	836	209	300
1:5 NHL 3,5		1045	209	325

Procedimento

Antes do início do ensaio, os provetes foram partidos ao meio manualmente. Uma das metades do provete foi inserida entre dois acessórios metálicos, um que assentou no prato inferior da prensa e outro sobre o qual a prensa exerceu o carregamento. As superfícies das referidas peças ficaram em contacto com as faces do provete numa área de 40x40 mm<sup>2</sup>, designada por área de secção comprimida.

O carregamento aumentou uniformemente até ocorrer rotura. Nessa ocasião, foi registado o valor da carga última de rotura correspondente ao valor máximo de força aplicada ao provete e verificável no gráfico força-deslocamento traçado pelo *software*.

Tratamento de resultados

Os valores de resistência à compressão resultaram do quociente entre a carga última de compressão e a área da secção comprimida.

A resistência à compressão final de cada argamassa, em cada idade, resultou da média das resistências calculadas para cada um dos três provetes.

Apresentação e análise de resultados

No Quadro 4.8 são apresentados os valores resumo das resistências mecânicas relativos aos provetes em estudo.

Quadro 4.8 – Quadro resumo dos valores de compressão realizados aos provetes

Agregado:	Ligante:	Traço:	48 horas		7 dias	
			σ (MPa)		σ (MPa)	
			média	desv P	média	desv P
Areia de rio	NHL 3.5	1:3	0.23	0.00	1.09	0.06
		1:4	0.14	0.01	0.74	0.09
	CL	1:3	0.10	0.02	0.51	0.05
		1:2	0.13	0.01	0.71	0.08
Solo de Évora	-	-	0.61	0.12	9.16	0.29
Solo SM	NHL 3.5	1:4	0.32	0.01	0.52	0.01
		1:5	0.27	0.00	0.44	0.01
Solo SB		1:4	0.47	0.01	0.90	0.05
		1:5	0.42	0.02	0.80	0.03

Através do ensaio de flexão realizado anteriormente, foi possível estimar a resistência à compressão dos blocos dos lotes E e B, apresentados no

Quadro 4.9, através da (4.2, que Morel (2007) definiu, tendo-se obtido os seguintes resultados (Quadro 4.10).

$$\sigma_{cif} = \frac{PL \sqrt{1 + \frac{L^2}{4e^2}}}{2h_0el} \tag{4.2}$$

Quadro 4.9 – Valores estimados de resistência à compressão através do ensaio de flexão

		$\sigma_{cif}$ (MPa)
BTC	E	0.424
	B	1.587

Os resultados das resistências à compressão das argamassas e da resistência estimada dos blocos são apresentados na Figura 4.20.

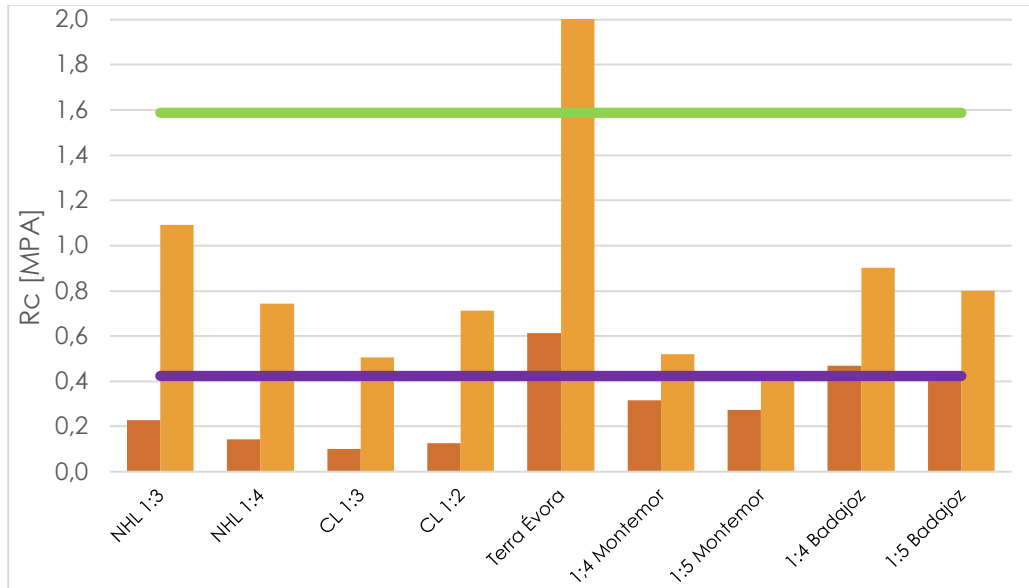


Figura 4.20 – Valores de resistência à compressão dos provetes em estudo, bem como indicação dos valores estimados de resistência à compressão dos blocos E e B.

Um parâmetro muito importante de referir foi que o colapso das argamassas de terra foi bastante dúctil, quase semelhante ao colapso de um aço, sendo esta uma característica muito importante numa argamassa de assentamento de blocos de terra.

Após a análise ponderada das características das argamassas no que respeita à resistência à compressão, foi decidida a adopção da argamassa 1:4 Montemor para a caracterização dos lotes E, TC e TB; da argamassa 1:4 Badajoz para caracterizar o lote B; e da argamassa de terra de Évora para caracterização do lote de C.

#### 4.6.2. Em estado seco

Os blocos foram preparados para o ensaio de acordo com a norma NBR 8492, conforme a descrição abaixo (Figura 4.21):

- Cortou-se o bloco ao meio com o auxílio de uma serra eléctrica, perpendicularmente à sua maior dimensão, e procedeu-se à limpeza das faces com ar comprimido para retirar o pó acumulado;
- Colocaram-se as duas metades dentro de um tabuleiro com cerca de 1 cm de água no fundo, durante aproximadamente 10 minutos;

- Retirou-se uma das metades que foi colocada no molde de madeira previamente nas instalações do DEC-FCT para este fim (este passo só foi realizado nos dois lotes de BTC devido às dimensões dos outros lotes serem diferentes);
- Colocou-se a argamassa previamente preparada sobre a face de uma das metades do bloco;
- Assentou-se a outra metade do bloco, realizando pressão para nivelar a superfície. Foi tido o cuidado de deixar as faces que foram cortadas em direcções opostas.

Nos lotes C, TC e TB houve necessidade de nivelar as superfícies dos blocos que ficariam em contacto com os pratos da prensa devido à irregularidade da superfície. Como a sobreposição das metades dos blocos não foi feita nos moldes, devido às suas dimensões, os provetes foram nivelados com recurso a um nível.



Figura 4.21 – Procedimentos de preparação dos blocos

#### **4.6.3. Em estado húmido**

A única diferença no procedimento do presente ensaio em relação aos ensaios no estado seco, foi a imersão dos blocos durante as 24 horas anteriores ao ensaio.

Devido a ser necessário os blocos serem imersos antes do ensaio, decidiu-se não realizar aos blocos crus, C e TC, pois os mesmos iriam-se desintegrar.

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de compressão

Lote	$\sigma$ seco [MPa]		$\sigma$ húmido [MPa]	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
B	4.22	0.57	2.36	0.25
E	0.88	0.09	0.54	0.04
TC	3.15	0.28	-	-
TB	8.88	0.50	9.50	2.09
C	2.25	0.20	-	-

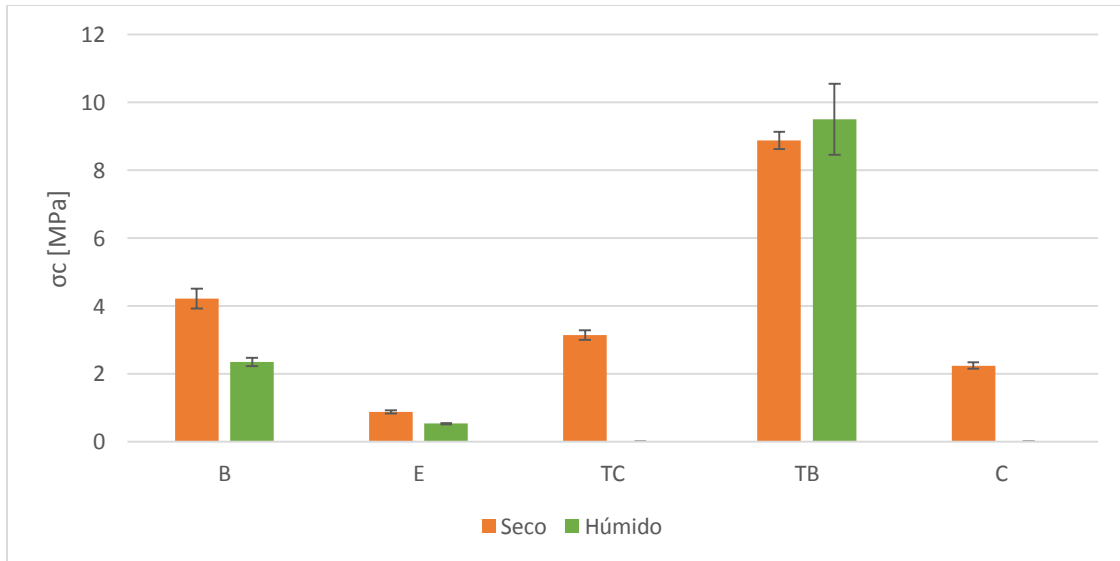


Figura 4.22 – Resultados do ensaio de compressão

A resistência dos blocos TC para os blocos TB aumentou em cerca de três vezes. Esta diferença de resistência entre blocos constituídos pelo mesmo material deve-se ao facto dos blocos TB serem posteriormente cozidos constituindo tijolos maciços de barro vermelho. Verifica-se assim o grande acréscimo que pode ser obtido pela calcinação dos blocos, associada também a um acréscimo energético para efetuar esse tratamento térmico (Quadro 4.11).

A resistência destes tijolos TB parece aumentar do estado seco para o húmido, mas o elevado desvio padrão não permite confirmar essa tendência. Nos provetes com blocos E e B (BTC's estabilizados quimicamente) a resistência à compressão diminuiu para cerca de metade quando foram ensaiados no estado húmido (Figura 4.22).

Pela positiva são de salientar os valores registados para os blocos TC e C, constituídos por terra não estabilizada quimicamente, com valores que ultrapassam os 2 MPa. Pela negativa, no entanto, são de salientar os baixos resultados obtidos com a alvenaria dos blocos E. Esses resultados podem ficar a dever-se a diversos aspetos, como sejam a incorporação de 25% de RCD, com características muito distintas de uma terra, e eventual cura dos blocos (estabilizados com HL5) demasiado seca. Pode-se afirmar que, segundo a norma UNE 41410 (AENOR, 2008), os blocos B (BTC da Solbloc) são classificados quanto a resistência à compressão como "BTC 3".

#### 4.7 Estabilidade dos Blocos Após Envelhecimento acelerado

O ensaio estabilidade dos blocos após envelhecimento acelerado simula a acção das intempéries sobre os materiais e as suas consequências na durabilidade destes. Assim, tenta-se acelerar processos patogénicos que potencialmente poderão vir a afectar os materiais em estudo, provocando grandes oscilações de temperatura e de humidade relativa. A imersão dos BTC's em água em conjunto com variações bruscas de temperatura pode provocar o colapso pontual ou mesmo total dos blocos.

A realização dos ensaios de envelhecimento foi baseada na norma brasileira NBR 13554, 1996 (NBR, 1996). No entanto, não se usaram provetes cilíndricos, como a norma prevê, tendo-se usado os blocos inteiros.

Uma vez que este ensaio implica a permanência dos provetes em contacto directo com água, o ensaio foi apenas executado aos 2 blocos de BTC's (E e B).

O ensaio foi realizado em 6 ciclos consecutivos de humedecimento/secagem, sendo iniciado pela imersão total dos blocos em água durante 6 horas e posterior secagem dos blocos em estufa a 70°C. Antes e depois da imersão, foram registadas as massas e volumes dos blocos. Não se realizou o processo de escovagem dos blocos, como definido na norma, pois tal procedimento iria inviabilizar o ensaio de compressão que se pretendia fazer *à posteriori*.

Devido à impossibilidade de ter equipamento que permitisse realizar medições segundo a direcção maior dos blocos, optou-se por fazer apenas medições na direcção da menor dimensão dos blocos, analisando apenas a variação unidireccional, ao invés de analisar a variação volumétrica.

Para calcular as variações de massa dos blocos em cada momento  $n$  foi utilizada a (4.3, que relaciona a massa do bloco num determinado momento com a sua massa inicial. A variação de massa é expressa em percentagem (%).

$$M_{v,n} = \frac{M_n - M_i}{M_i} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde  $M_{v,n}$  é a variação de massa do BTC em cada instante (em percentagem);  $M_n$  é a massa do BTC em cada instante medido; e  $M_i$  é a massa inicial do BTC no instante 0 do ensaio.

Para se proceder ao cálculo das variações dimensionais dos blocos foi utilizada a (4.4, em que utiliza a altura inicial do bloco como referência. A variação dimensional também é expressa em percentagem (%).

$$U_{v,n} = \frac{U_n - U_i}{U_i} \times 100 \quad (4.4)$$

Onde  $U_{v,n}$  é a variação de altura do BTC em cada instante (em percentagem);  $U_n$  é a altura do BTC em cada instante medido; e  $U_i$  é a altura inicial do BTC no instante 0 do ensaio.

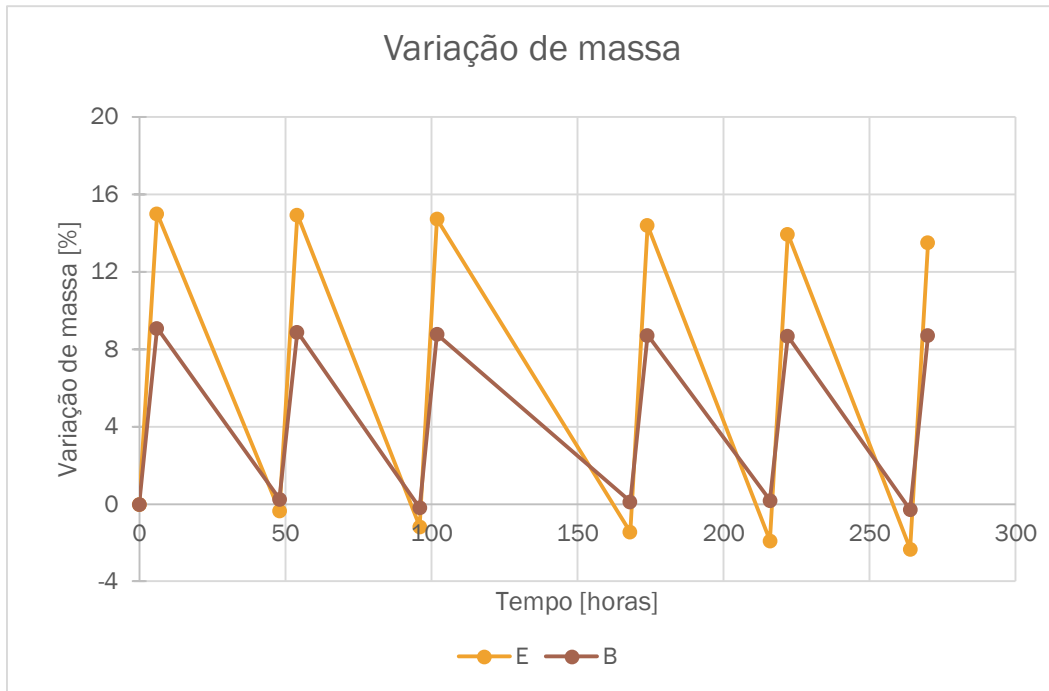


Figura 4.23 – Variação de massa em função do tempo

Na Figura 4.23, pode-se constatar que a amplitude da variação de massa é muito superior nos Blocos E, do que nos blocos B. Sendo que no estado seco do Lote E, supostamente os valores deveriam ser sempre próximos de 0, como acontece com o lote B, mas estes passam a ser inferiores sempre a zero, o que demonstra que houve perda de massa.

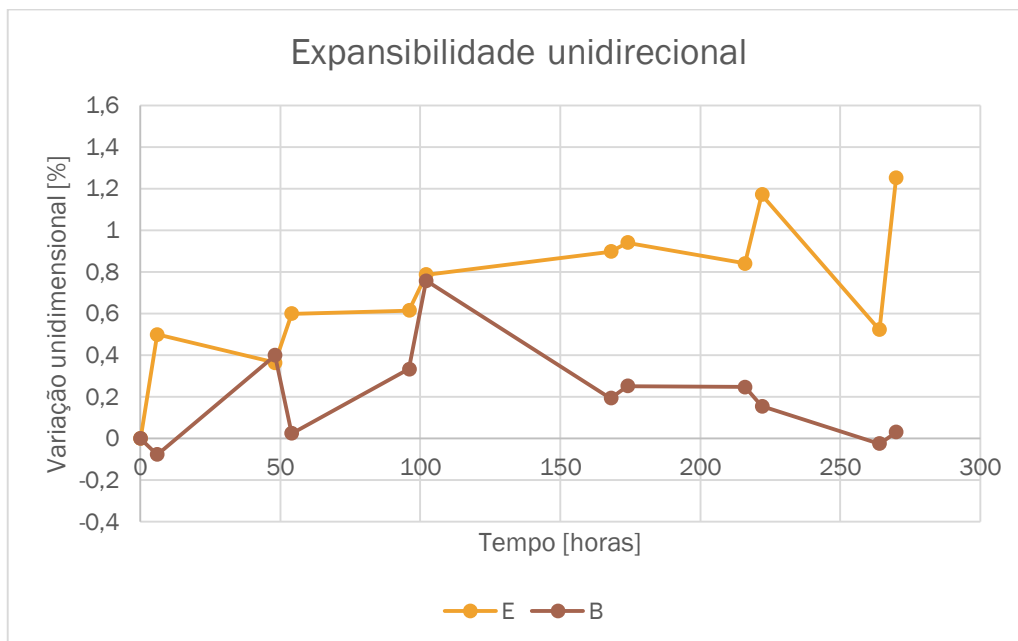


Figura 4.24 – Variação unidimensional em função do tempo

Na Figura 4.24, verifica-se que os blocos expandiram durante a realização deste ensaio, sendo que os blocos do lote B têm uma tendência um pouco mais aleatória, mas nos blocos do lote E tem-se uma estabilização dos valores em redor do 1% sensivelmente.



Figura 4.25 – À esquerda pode-se ver o lote B durante o período de imersão em água; à direita está o lote E após os 6 ciclos do ensaio;

Na Figura 4.25 é visível o desgaste e a quebra de um dos blocos do lote E, e o aparecimento de esferas de pequeno diâmetro, que provavelmente deverá ser partes do solo que não foram estabilizadas e por variações de dimensão neste ciclo provocaram a degradação dos blocos.



Figura 4.26 – Ensaio de envelhecimento acelerado

Na Figura 4.26 – à esquerda tem-se o bloco que colapsou durante a realização do ensaio; na foto à direita pode-se ver a matéria perdida pelos blocos do lote E durante a realização do ensaio.

Este ensaio permite aferir diversas propriedades dos blocos tais como: absorção máxima de água, variações dimensionais e erosão acelerada dos blocos, sendo este um ensaio que resume bastante bem todas estas características.

## 4.8 Erosão a seco

Para a realização deste ensaio foi desenvolvido um equipamento próprio, idealizado e concebido com o auxílio do Engenheiro Vítor Silva, nos laboratórios de DEC-FCT. O princípio deste equipamento é simular a acção descrita em “Résistance à l’abrasion” (AAVV, 2000), mas eliminando o factor humano neste ensaio, de modo a dar resultados mais fidedignos, utilizando desta forma um braço mecânico.

O funcionamento desta máquina tem como base um êmbolo movido a ar comprimido que tem acoplado na sua extremidade uma escova de aço (Figura 4.27). Esta na sua parte superior, tem agrupado dois pesos em chumbo que totalizam uma massa de três quilogramas.



Figura 4.27 – Escova que se encontra acoplada na superfície deslizante do mecanismo

Para realizar a inversão do curso do êmbolo foram colocados dois sensores eléctricos de contacto, respectivamente no início e no fim do movimento. Estes sensores podem ser movidos livremente na calha de forma a ajustar o melhor possível o movimento da escova, como se pode visualizar na Figura 4.28



Figura 4.28 – Máquina de erosão a seco com destaque dos inversores

Para a realização deste ensaio os blocos encontravam-se em ambiente condicionado com condições de HR e temperatura controladas de, respectivamente,  $65\pm 5\%$  e  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

No ensaio descrito pelo CRATerre (AAVV, 2000), são indicados 60 ciclos de desgaste em 1 minuto, mas devido ao rápido desgaste dos blocos E houve necessidade de reduzir os ciclos para 30.

Para tal decisão contribuiu o facto de a escova nos 60 ciclos ficar bastantes vezes presa nos sulcos que ia criando devido à sua profundidade (Figura 4.29)



Figura 4.29 –Bloco do lote E após o ensaio

Foram realizadas duas escovagens em cada face dos blocos, suficientemente afastadas para não interferirem uma com a outra. Tendo sido realizado o ensaio nas duas faces de maior área dos blocos opostas, com o procedimento que se detalha de seguida:

- Limpou-se as superfícies dos blocos com ar comprimido;
- Determinou-se a massa do bloco;
- Posicionou-se o bloco no equipamento e ajustou-se a escova de desgaste para um dos pontos iniciais do ensaio;
- Abriu-se a torneira do sistema de ar comprimido;
- Realizaram-se 30 ciclos de escovagem, em que a contagem do ciclo é iniciada quando a escova passa num ponto, ficando este concluído quando esta torna a passar no mesmo ponto;
- Deslocou-se o bloco lateralmente e repetiu-se o passo anterior;
- Removeu-se o bloco do equipamento e limpou-se as superfícies com a ajuda de ar comprimido, tendo-se procedido ao registo da massa do bloco;
- Colocou-se o bloco novamente no aparato com a face oposta à analisada anteriormente em contacto com a escova e repetiram-se os passos descritos anteriormente;
- Determinaram-se os coeficientes de abrasão através da (4.5)

$$C_a = \frac{S}{m_1 - m_2} \quad (4.5)$$

Onde:

Ca – coeficiente de abrasão [cm<sup>2</sup>/g]

S – área de desgaste [cm<sup>2</sup>]

m1 – massa do bloco antes do ensaio (em cada face) [g]

m2 – massa do bloco após o ensaio (em cada face) [g]

Quadro 4.11 – Resultados do ensaio de erosão a seco

Lote	CA [cm <sup>2</sup> /g]			
	Face Superior		Face Inferior	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
C	9.83	2.46	7.37	1.77
TC	13.20	0.49	8.44	1.07
TB	22.55	9.93	12.91	3.06
B	9.74	3.89	6.70	1.55
E	1.09	0.32	0.76	0.21

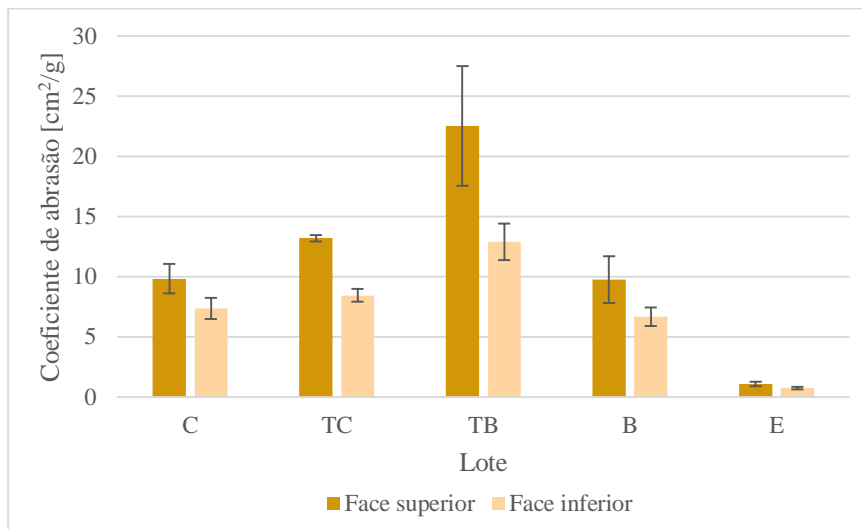


Figura 4.30 – Resultados do ensaio de erosão a seco

No Quadro 4.12 e na Figura 4.30 são apresentados os resultados deste ensaio, sendo que os blocos do lote E são aqueles que apresentam um pior comportamento ao desgaste simulado, e os blocos do lote TB, apresentam o melhor comportamento. Os B, C, e TC têm um comportamento semelhante entre eles. De referir que a face superior denota sempre um melhor comportamento neste ensaio.

#### 4.9 Abrasão húmida

O ensaio foi realizado com base no procedimento descrito em Bulletin 5 (Middleton, 1987), embora introduzindo alterações sugeridas por Cid-Falceto (2012), tais como:

- Redefiniu-se a distância da ponteira do jacto até à superfície do bloco para 500 milímetros, ao contrário dos 470 milímetros definidos;
- Reduziu-se o diâmetro da área de exposição de 15 cm para 12 cm;
- Os resultados do ensaio foram analisados em função da perda de massa dos blocos e não da profundidade dos orifícios causados pelo jacto de água.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um dispersor de água com manómetro. O equipamento, já existente, foi optimizado pelo autor, tendo sido dada especial atenção à reutilização da água do ensaio, para a qual foi necessária a instalação de uma bomba de água. Foi ainda tido o cuidado de aproveitar águas pluviais. Na Figura 4.31 apresenta-se o equipamento utilizado.



Figura 4.31 – Equipamento do ensaio de erosão húmida

Para a realização deste ensaio os blocos foram previamente colocados em estufa a uma temperatura de  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  até não se verificarem variações significativas de massa.

O ensaio foi realizado numa das metades dos blocos, resultante do ensaio de tracção por flexão, e foi avaliado o impacto do jacto de água na face superior e inferior de cada metade. Neste ensaio não foi analisado o lote TB, visto tratar-se de um material cerâmico, não se enquadrando no âmbito deste ensaio, nem os lotes TC e C.

Procedimento:

- Limpam-se as superfícies dos blocos com ar comprimido;
- Aferiram-se as massas dos blocos;
- Posicionou-se o bloco e o equipamento;
- Abriu-se a torneira do sistema e ajustou-se a pressão de água para 50 KPa;
- Fechou-se a torneira após 1 hora do seu início.
- Colocou-se o bloco em estufa até atingir massa constante, ou seja, entre medições sucessivas de 24 h não diferirem mais de 0,1% de massa;
- Registou-se a massa seca do bloco e repetiram-se os passos anteriores para a outra face;
- Determinaram-se o coeficiente de abrasão através da (4.6)

$$C_{ah} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (4.6)$$

Onde:

$C_{ah}$  – coeficiente de abrasão [%]

$m_0$  – massa do bloco antes do ensaio (em cada face) [g]

$m_1$  – massa do bloco após o ensaio (em cada face) [g]

Quadro 4.12 – Resultados do ensaio de erosão humida

Lote	Cah [%]			
	Face inferior		Face superior	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
B	0.21	0.02	0.27	0.06
E	1.11	0.06	1.12	0.19

Neste ensaio os Blocos do lote B têm um melhor comportamento em ambas as faces, comparativamente com os blocos do lote E. E em relação à diferença de comportamento entre faces diferente do mesmo lote, não se pode afirmar que existam grandes diferenças entre elas, devido a um elevado desvio padrão (Quadro 4.13).

#### 4.10 Drop test

O ensaio foi realizado segundo o ensaio de erosão acelerada Swinburne (SAET) indicado na norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008). Para tal foi construído pelo autor um equipamento, semelhante ao indicado na norma, nos laboratórios do DEC-FCT (Figura 4.32).



Figura 4.32 – Construção do equipamento para o ensaio de drop test

Novamente foi tido em atenção o reaproveitamento de águas no ensaio, tendo-se criado um sistema fechado de circulação de água.

Para a realização deste ensaio os blocos foram colocados em estufa com temperatura controlada a  $60 \pm 5^\circ\text{C}$ , para que o seu teor de humidade não influenciasse os resultados calculados.

O ensaio foi realizado numa das metades resultantes do ensaio de tracção por flexão. No ensaio foi avaliado o grau de erosão numa face lateral pois, num assentamento dos blocos a meia vez, esta será a face que estará em contacto directo com o exterior e, portanto que estará mais exposta às condições ambientais. Neste ensaio não se analisou os blocos TB, uma vez que se tratam

de um material cerâmico, pelo que não se enquadra no âmbito deste ensaio. Nem os lotes TC e C, por ser um ensaio demasiado agressivo para os mesmos.

Procedimento:

- Limpam-se as superfícies dos blocos com ar comprimido;
- Aferiram-se as massas dos blocos;
- Posicionou-se o bloco no equipamento;
- Deixou-se cair uma corrente contínua de água sobre o bloco durante 10 minutos através de um tubo com 5 milímetros de diâmetro interior, o nível da água foi colocado a uma altura de 1,5 metros sobre a face do bloco;
- Após 10 minutos deu-se por terminado o ensaio;
- Mediu-se a profundidade dos orifícios criados pelo impacto da água, com recurso a uma varinha com 3 mm de diâmetro;
- Colocou-se o bloco em estufa até atingir massa constante, ou seja, entre medições de massa sucessivas de 24 h não diferirem mais de 0,1% de massa;
- Registou-se a massa seca do bloco;
- Determinou-se o a perda de massa do bloco através da Equação 4.7

$$C_{dt} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (4.7)$$

Onde:

$C_{dt}$  – coeficiente de Drop test [%]

$m_0$  – massa do bloco antes do ensaio (em cada face) [g]

$m_1$  – massa do bloco após o ensaio (em cada face) [g]



Figura 4.33 – Preparação do ensaio drop test

Resultados:

Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de drop test

Lote	Cadt [%]			
	Face inferior		Face superior	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
B	0.05	0.01	0.44	0.03
E	0.2	0.16	2.08	1.23

Neste ensaio os Blocos do lote B têm um melhor comportamento em ambas as faces, comparativamente com os blocos do lote E. A face inferior dos blocos neste ensaio apresenta um melhor comportamento do que a face superior, em ambos os blocos (Quadro 4.14).

#### 4.11 Expansibilidade unidireccional

Este ensaio foi realizado com o intuito de analisar os blocos aquando da sua imersão em água e a sua propriedade de variação dimensional.

Este ensaio apenas foi pensado numa fase final da campanha experimental, tendo sido apenas realizado um ensaio num único bloco dos dois lotes dos BTC, E e B. Tal deveu-se ao facto de no ensaio de envelhecimento acelerado terem-se verificado bastantes alterações volumétricas, principalmente no Lote E.

Para tal recorreu-se a um deflectómetro analítico existente nos laboratórios do DEC-FCT, e colou-se nos topos dos blocos uma peça de acrílico com o encaixe do deflectómetro (Figura 4.34 e Figura 4.35).



Figura 4.34 – Bloco no ensaio

- Colocou-se o bloco dentro de um recipiente em acrílico, juntamente com o deflectómetro devidamente tarado;



Figura 4.35 – Pormenor do encaixe no deflectómetro

- Encheu-se o recipiente de água e iniciou-se o ensaio;
- Registou-se o deslocamento aos 5, 10, 15, 30 minutos e de hora em hora até às 24 horas de ensaio.

Quadro 4.14 – Expansão unidireccional dos blocos E e B

Duração [min]	Expansão unidireccional [mm]	
	Blocos	
	E	B
0	0	0
5	0.281	0.017
10	0.443	0.035
15	0.499	0.045
30	0.586	0.065
60	0.761	0.091
120	1.1	0.108
180	1.367	0.114
240	1.532	0.12
300	1.595	0.122
360	1.674	0.136
420	1.706	0.139
1440	2.176	0.16

Graficamente os resultados obtidos da expansão unidireccional são expressos na Figura 4.36

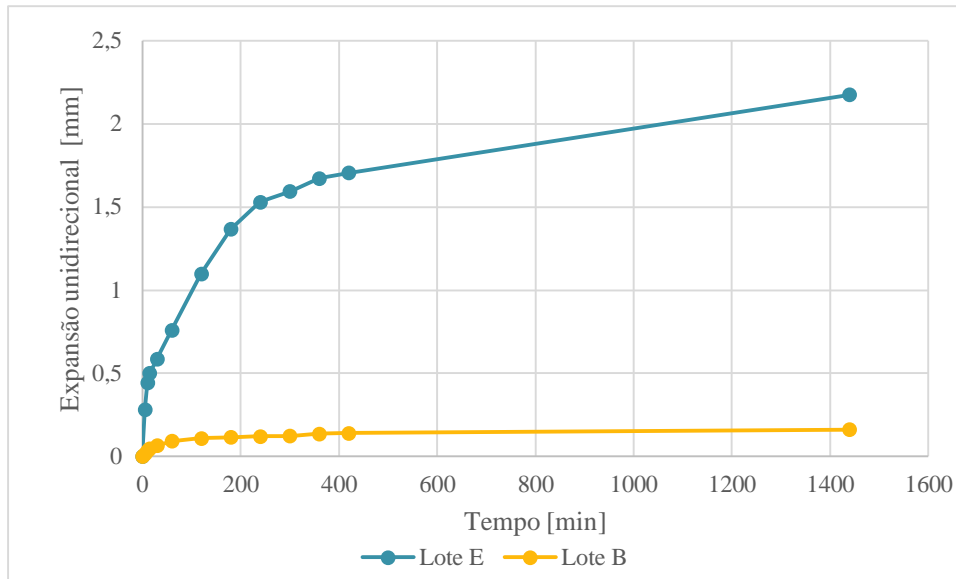


Figura 4.36 – Expansão unidireccional dos blocos E e B

Após análise da Figura 4.36, verificou-se claramente que o bloco do lote E não se encontra estabilizado, tendo tido deformações excessivas, enquanto o bloco B as deformações foram ínfimas.

## 4.12 Discussão global dos resultados

No Quadro 4.15 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos no decorrer do trabalho experimental.

Numa análise comparativa entre os ensaios realizados é possível observar uma correspondência directa entre os resultados dos ensaios de condutibilidade térmica e da velocidade de propagação de ultra-sons, verificando-se que materiais que apresentam menor valor de condutibilidade térmica, apresentam também menores valores de velocidade de propagação de ultra-sons. Tal correspondência indicia que esses materiais possam ser mais porosos.

Verifica-se no caso dos ensaios de capilaridade e absorção de água a baixa pressão, os BTC do lote E absorvem maior quantidade de água e também mais rapidamente. Também estas características poderão estar associadas ao material ser mais poroso.

Comparando os BTC, o lote E apresenta menor resistência à compressão, e pior comportamento quando sujeito a fenómenos de erosão.

No ensaio de resistência à compressão o tijolo cozido apresenta o maior valor, apesar deste material exibir menores valores de condutibilidade térmica e de velocidade de propagação de ultra-sons.

Quadro 4.15 – Quadro resumo de resultados

Ensaio:	Blocos:	E	B	C	TC	TB	
Condutibilidade Térmica [w/m.°C]	Média	0.519	0.999	0.822	0.922	0.458	
	Desvio P.	0.019	0.051	0.098	0.101	0.034	
Vel. de Propagação de Ultra- sons [m/s]	Média	884.1	1142	996.9	1133.8	708.7	
	Desvio P.	105.7	228.7	180.5	229.8	160.1	
Absorção de água a baixa pressão   30 min. [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )]	Média	3.04	0.54	0.02	0.02	0.69	
	Desvio P.	0.72	0.16	0.01	0.01	0.33	
Capilaridade   CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )]	Média	3.74	1.14	0.72	1.07	0.96	
	Desvio P.	0.2	0.08	0.09	0.03	0.13	
Capilaridade   VA [kg/m <sup>2</sup> ]	Média	26.08	18.51	18.74	15.29	16.08	
	Desvio P.	0.62	0.59	1.21	0.73	1.07	
Resistência à compressão [Mpa]	Seco	Média	0.88	4.22	2.25	3.15	8.88
		Desv. P.	0.09	0.57	0.2	0.28	0.5
	Húmido	Média	0.54	2.36	-	-	9.5
		Desv. P.	0.04	0.25	-	-	2.09
Erosão a seco [cm <sup>2</sup> /g]	Face Superior	Média	1.09	9.74	9.83	13.2	22.55
		Desv. P.	0.32	3.89	2.46	0.49	9.93
	Face Inferior	Média	0.76	6.7	7.37	8.44	12.91
		Desv. P.	0.21	1.55	1.77	1.07	3.06
Abrasão húmida [%]	Face Superior	Média	1.11	0.21	-	-	-
		Desv. P.	0.06	0.02	-	-	-
	Face Inferior	Média	1.12	0.27	-	-	-
		Desv. P.	0.19	0.06	-	-	-
Drop Test [%]	Face Superior	Média	0.2	0.05	-	-	-
		Desv. P.	0.16	0.01	-	-	-
	Face Inferior	Média	2.08	0.44	-	-	-
		Desv. P.	1.23	0.03	-	-	-

#### Análise comparativa com estudos de outros autores

As propriedades mecânicas dos blocos de terra comprimida foram analisadas por Guettala et al. (2006) que produziu provetes com solos recolhidos na região de Bikra (Argélia) estabilizados com cimento, cal e resina em diferentes teores.

À semelhança do estudo realizado no presente trabalho, a resistência à compressão também foi analisada em estado húmido e seco, verificando-se também que os valores de Rc obtidos na análise em estado seco são significativamente superiores.

Comparativamente ao trabalho realizado pelo autor, o estudo de Guettala et al. (2006) apresentou resultados de resistência à compressão bastante superiores, variando no caso do estado seco entre 15,4 MPa, para a amostra estabilizada com 5% de cimento e 21,5 MPa, para a amostra

estabilizada com 8% de cimento e 4% de cal. No caso da análise em estado húmido, os valores variam entre 9 MPa e 15,6 MPa para as mesmas amostras respectivamente.

As diferenças de resultados entre os BTC dos lotes E e B para os blocos analisados por Guettala et al. (2006) poderão resultar das diferenças na estabilização dos solos, sendo que os blocos do lote E foram estabilizados com 6,25% de cal hidráulica HL5 e os blocos do lote B com 5% de cimento e 1,7% de cal aérea (CL). Essa não será a única razão possível para as diferenças, uma vez que os valores de  $R_c$  dos blocos do lote B para os blocos estabilizados com 5% de cimento e para blocos estabilizados com 5% de cimento e 3% de cal são, do mesmo modo, bastante inferiores. O tipo de solo, o fabrico dos blocos ou o procedimento de ensaio são factores que podem ter influenciado a divergência de valores.

Coroado et al. (2010) analisou a resistência à compressão de adobes presentes em edifícios localizados em Aveiro. Os valores obtidos variam entre 0,25 MPa a 2,7 MPa. Neste caso, as diferenças dos valores não são significativas, mas os adobes do lote TC apresentam valores de  $R_c$  superiores e os adobes do lote também apresentam valores de resistência superiores à maioria das amostras estudadas por Coroado et al. (2010). Também no caso dos adobes as diferenças poderão ser motivadas por diversos factores.

Coroado et al. (2010) também analisou o comportamento dos adobes na absorção capilar. A análise também foi feita de acordo com a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009). Os coeficientes de capilaridade variam entre 3,17 kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>) e 9,62 kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>). Os valores obtidos por Coroado et al (2010) são superiores aos valores obtidos pelo autor no presente trabalho, pelo que a velocidade de absorção de água desses adobes é superior.

O ITE 50 (LNEC, 2006) define valores de referência de condutibilidade térmica para o betão (entre 1,65 a 2 [W/(m°C)]) e para os elementos de construção em que utilize terra de 1,1 W/(m°C). Os valores de condutibilidade térmica obtidos no presente trabalho são inferiores aos valores de referência, no entanto essa diferença apenas é significativa no caso dos BTC do lote E e dos tijolos cozidos (lote TB). Conclui-se que pelo facto dos valores obtidos serem inferiores aos valores de referência, que qualquer um dos lotes tem um bom comportamento ao nível da transmissão térmica.



## 5. CASO PRÁTICO – CONSTRUÇÃO DO ABANCÓDROMO

### 5.1 Descrição geral

No presente capítulo é apresentado um exemplo prático de aplicação de blocos de terra comprimida (BTC), o *Abancódromo*,

O *Abancódromo* foi um projecto implementado pelas Oficinas do Convento – Associação Cultural de Arte e Comunicação, no âmbito da Requalificação Urbana da área do Rossio, localizado na cidade de Montemor-o-Novo. Este projecto consistiu na construção de uma estrutura destinada a promover o convívio e o lazer da população local.

A estrutura divide-se em duas peças separadas, uma longa como uma serpentina e com altura variável e outra curta e enrolada, encaixando na primeira.

Em termos construtivos, ao nível das fundações, foi feito um ensoleiramento geral, numa área total de cerca de 46m<sup>2</sup>, com enrocamento betonado. Sobre a sapata, foi construído o soco da estrutura, com uma altura aproximada de 0,30m, constituído por alvenaria de pedra irregular assente com uma argamassa cimentícia com areia de rio lavada, ao traço volumétrico 1:4. Tendo sido aplicado uma emulsão betuminosa entre o embasamento da estrutura e a base de assentamento da primeira fiada dos BTC, de forma a impedir a ascensão de água por capilaridade.



Figura 5.1 – Construção da alvenaria

A estrutura é autoportante, sendo formada por alvenaria de BTC. Estes blocos pertencem ao lote E de BTC analisados no presente trabalho, produzidos com o intuito final da construção do *Abancódromo*.

Os blocos poderiam ter sido fabricados no local da obra, evitando despesas de transporte e armazenamento dos blocos no Telheiro da Encosta do Castelo. No entanto, dada a proximidade entre

os dois locais e para evitar o transporte do equipamento e dos materiais a utilizar, optou-se por produzir os BTC no Telheiro da Encosta do Castelo.

Conforme referido anteriormente, no Capítulo 3, os BTC foram estabilizados com cal hidráulica HL5, da Secil. Para assentamento dos blocos, foi utilizada uma argamassa bastarda ao traço 1:2:8 (cal hidráulica:cal aérea:areia fina).



Figura 5.2 – Alvenaria do Abancódromo

Ao nível dos revestimentos, a superfície foi escovada para retirar as partículas desagregadas e aspergida com esguicho de água. Foi aplicado um emboço com argamassa bastarda de cal aérea e cimento ao traço 1:1:8 (cimento:cal aérea:areia grossa). No reboco foi aplicada uma argamassa bastarda de cal hidráulica HL5 e cimento, com traço volumétrico 1:2:8 (cal hidráulica:cal aérea:areia do pinhal).



Figura 5.3 – Abancódromo por caiar

O acabamento final das estruturas é a caiação, uma vez que as estruturas construídas em terra não devem ser pintadas com tintas plásticas, dada a sua impermeabilidade. A estrutura foi caiada, utilizando uma cal que foi extinta imediatamente antes da aplicação por imersão da cal viva em água.



Figura 5.4 - Abancódomo

## 5.2 Análise crítica

Ainda no que respeita às camadas de revestimento aplicadas, repare-se que a escolha das argamassas não foi a mais indicada, visto que a argamassa utilizada para o revestimento exterior é mais forte do que a utilizada para o emboço, o que poderá originar fissuração e destaque do reboco. Na realidade, após um período de cerca de 2 anos após a construção da estrutura, verificaram-se diversas fissuras e destaques pontuais do reboco. Possivelmente, tal acontece devido à má compatibilidade dos materiais utilizados.

Em relação à estrutura, devido à expansibilidade dos blocos, comprovada no capítulo anterior, verificam-se à data do presente trabalho, diversas fendas verticais. Desta verificação, concluiu-se que a estabilização dos blocos não foi a mais adequada, pelo que a caracterização dos BTC é fundamental.



Figura 5.5 – Destaque e fissuração de reboco

Na Figura 5.2 pode-se visualizar a fendilhação entre uma zona que tem uma maior espessura de reboco e o suporte, tal deve-se à incompatibilidade da argamassa em relação ao suporte; Na Figura 5.3 podem-se constatar várias zonas em que o reboco foi atingido por pedras,



Figura 5.6 – Situação originada por vandalização



Figura 5.7 Fendilhação do reboco



Figura 5.8 – Destaque, Fissuração e Vandalização

Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, podem-se visualizar problemas de detaque, fissuração e vandalização que a estrutura tem sofrido.



Figura 5.9 – Faixa húmida junto do embasamento e com realce de fendilhação



Figura 5.10 – Destaque total do reboco

Na sequência destas anomalias, foi necessário intervir para minorar estes problemas, e que o abancódromo dure o máximo de tempo possível. Para tal foram substituídos cerca zonas de reboco, utilizando uma argamassa com um menor módulo de elasticidade, e que neste caso optou-se por utilizar uma cal hidráulica natural como ligante da argamassa.



## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações finais

Após um vasto e longo trabalho de caracterização experimental em que se analisou tanto o solo como os blocos para poderem ser utilizados em paredes de alvenaria, por vezes foi necessário adaptar ensaios e até criar novos procedimentos que não existem na bibliografia consultada; houve inclusive necessidade de se inventar utensílios/equipamentos e procedimentos para se poder trabalhar com o maior rigor possível nesta dissertação.

Considera-se ter contribuído para a melhoria e abrangência dos procedimentos experimentais para a caracterização de blocos em terra.

Foi avaliado o comportamento mecânico, o comportamento face à acção da água e o comportamento térmico. No desenvolvimento deste trabalho teve-se em conta, preferencialmente, normas europeias caso existissem e também foi complementado o trabalho através do estudo de normas de vários países que já tem legislação sobre blocos de terra.

Criando um paralelismo entre lotes de BTC, verifica-se que o Lote E, tem menos velocidade de propagação de ultra-sons, menor conductibilidade térmica, maiores perdas de matéria por abração, no envelhecimento acelerado houve quebras dos blocos, capilaridades cerca de três vezes superiores às do lote B, e na realidade no Abancódromo verificaram-se todas estas problemáticas estudadas em laboratório.

O projecto de dissertação foi desenvolvido em estreita relação com os produtores dos blocos, tendo sempre atenção aos problemas com que estes se deparam para tentarem comercializar estes materiais. Desta forma, procurou-se sempre dar-se uma resposta aos seus problemas.

Finalizada a dissertação, considera-se que os objectivos iniciais foram cumpridos e nalguns casos atingiu-se patamares superiores aos inicialmente propostos. Neste âmbito destaca-se o desenvolvimento de vários procedimentos de ensaios novos, seguidos no âmbito desta dissertação e até instrumentos de ensaio que foram construídos nas próprias instalações do DEC-FCT.

No âmbito do desenvolvimento do presente trabalho foi publicado e apresentado publicamente em Coimbra, no Congresso Nacional “Argamassas 2014” em Junho de 2014, uma comunicação intitulada “Caracterização de argamassas de assentamento e de alvenarias de blocos de terra”. Também submetido um resumo para o congresso internacional de construção em terra “Terra 2016.

Parte desta dissertação foi também já apresentada em dois seminários nacionais realizados em Montemor-o-Novo e em Viana do Alentejo.

Ao Autor desta dissertação foi dada a possibilidade de ter estado a estagiar na Associação Cultural Oficinas do Convento, no qual orientou e participou activamente em duas campanhas de produção de BTC, construção em taipa, Fiscalização de obras e caracterização empírica e laboratorial de solos.

## 6.2 Propostas para trabalhos futuros

Durante o decorrer deste trabalho surgiram várias ideias que podem ser seguidas para melhor desenvolver esta área de investigação:

- Realizar o ensaio Proctor a solos com e sem adição de ligante, de forma a analisar as diferenças dos resultados obtidos e identificar a possível necessidade de adicionar ou reduzir as quantidades de água;
- Para um melhor conhecimento do tipo de solo utilizado, principalmente no que respeita ao tipo e à quantidade de argila presente, bem como à sua influência no comportamento do solo, é essencial a realização de ensaios de caracterização mais aprofundados aos solos;
- Proceder à caracterização de BTC produzidos com o mesmo tipo de solo mas com estabilização química com diferentes ligantes e com teores variáveis de ligante;
- Efectuar uma análise mais abrangente dos resultados obtidos com trabalhos de outros autores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2012). NBR 8491:2012 - *Tijolo de solo-cimento – Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

ABNT (2012). NBR 8492:2012 - *Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

ABNT (2012). NBR 13554:2012 - *Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

AAVV (2000). *Guide: Blocs de terre comprimé- procédures d'essais: Résistance à l'Abrasion*. Bruxelles: CRATerre. Centre pour le Développement de l'Entreprise ACP. ENTPE

AENOR. (2008). UNE 41410 - *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización y Certificación.

BOGAS, J. A. (2013). *Materiais cerâmicos: Estrutura e comportamento dos materiais*. Instituto Superior Técnico. Lisboa – Portugal.

BOCH, P; NIÈPCE, J-C. (2007). *Ceramic materials – Processes, properties and applications*, ISTE.

BUSON, M. (2009). *Kraftterra*. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

CEN (1999). *EN 1015-11 – Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2002). *EN 1015-18 – Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2009). *EN 15801 – Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2010). *EN 459-1 – Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels, European Committee for Standardization.

CID, J.; MAZARRÓN, F. R.; CAÑAS, I. (2011). *The earth building normative documents in the world*. Informes de La Construcción, 63 (523), 159–169.

CID-FALCETO, J., MAZARRÓN, F. R., & CAÑAS, I. (2012). *Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests*. Construction and Building Materials, 37, 738–745.

COUTINHO, J. S. (1988) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I, 2ª Edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

DELGADO, M. C.; GUERREIRO, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: a normative review. Construction and Building Materials 18, (p. 237-251)

DOAT, P.; HAYS, A.; HOUBEN, H.; MATUK, S.; VITOUX, F. (1979). *Construire em terre*. CRAterre – École d'Architecture de Grenoble. France.

FARIA-RODRIGUES, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento. FCT-UNL. Lisboa - Portugal.

FARIA, P. (2012). *Argamassas sustentáveis*. comunicação da “2ª Conferência Construção e reabilitação sustentável de edifícios no espaço lusófono”. FCT-UNL. Lisboa - Portugal. [[http://run.unl.pt/bitstream/10362/9494/1/Faria\\_2012.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/9494/1/Faria_2012.pdf)]

FERNANDES, M (2006). *Técnicas de construção em terra*, Terra: forma de construir. Arquitectura. Antropologia. Arqueologia – 10ª mesa redonda de primavera. Porto. Argumentum

FONTES, T. (2013). *Argamassas de cal hidraulica natural NHL3.5 de fabrico nacional: otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa - Portugal.

GOMES, M. I. (2013). *Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação*. Tese de Doutoramento. FCT-UNL. Lisboa - Portugal.

GOMES, M. I.; GONÇALVES, T. D.; FARIA, P. (2014). Unstabilised rammed earth: Characterization of the material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements. International Journal of Architectural Heritage, 185 – 212.

IPQ. (2002). NP EN 772-1:2012. *Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 1: determinação de resistencia à compressão*. Instituto Português de Qualidade. Lisboa – Portugal.

IPQ (2011). *NP EN 459-1 – Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. Lisboa – Portugal.

KERALI, A. G. (2005). In-service deterioration of compressed earth blocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(4), 461–468.

KERALI, A. G., & Thomas, T. H. (2004). Simple durability test for cement stabilized blocks. *Building Research & Information*, 32(2), 140–145.

LIMA, S. A.; VARUM, H.; SALES, A.; NETO, V. F. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829–837.

LNEC (1966a). *Especificação LNEC E-195. Solos: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

LNEC (1966b). *Especificação LNEC E-196. Solos: Análise granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

LNEC (1966c). *Especificação LNEC E-197. Solos: Ensaio de compactação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

LNEC (1969). *NP 143. Solos: Determinação dos Limites de consistência*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

LNEC (1970). *Especificação LNEC E-239. Solos: Análise granulométrica de terrenos: vocabulário*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa – Portugal.

MIDDLETON, G. F. (1992). *Bulletin 5. Earth wall construction*. Fourth Edition, CSIRO Division of Building, Construction and Engineering, North Ryde, Australia.

MINKE, G. (2000). *Earth construction handBook. The building material earth in the modern architecture*. WIT Press, Southampton, U.K.

MOREL, J. C.; PKLA, A. (2002). A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the “3 points bending test.” *Construction and Building Materials*, 16(5), 303–310.

MOREL, J. C., PKLA, A., & WALKER, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309.

NTC (2014). 5324: Bloques de suelo semento para muros y divisiones. Deficiones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. (p. 42). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NZS (1998a). NZS 4298:1998. Materials workmanshio earth build.

NZS (1998b). NZS 4299:1998. Earth build not requiring specific design.

OLIVIER, M. ; MESBAH, A.; EL GHARBI, Z.; MOREL, J. C. (1997). Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. *Materials and Structures*, 30(9), 515–517.

PROTERRA (2011). *Técnicas de construção com terra*. Proterra - Rede Ibero-Americana Proterra.

SCHROEDER, H.; ZIEGERT, C.; MÜLLER, U. (2012). Standardisation in earthen building in Germany: Situation. In 6<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth, LEHM 2012, Weimar, Germany, Dachverband Lehm 57-71.

SEQUEIRA, A.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. Comunicação do “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”. APFAC. Lisboa. [[http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2061\\_07.pdf](http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2061_07.pdf)]

RILEM (1998). RILEM TC 164 – EBM. *Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment*. RILEM Publications SARL.

SOUZA, M. I. B. de, SEGANTINI, A. A. da S., & SANTOS, J. P. dos. (2006). Tijolos prensados de solo-cimento com adição de resíduos de concreto. Proceedings of the 6. Encontro de Energia No Meio Rural.

[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000200045&script=sci\\_arttext&lng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000200045&script=sci_arttext&lng=pt)

SOUZA, M. (2006). Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brazil.

STANDARDS AUSTRALIA (2002). *The Australian Building Handbook*. Standards Australia.

SENSICO (1999). *Norma Técnica de Edificação NTE E.080: Adobe*. Lima: Reglamento de Construcciones. SENSICO.

TORGAL, F. P.; EIRES, R. M. G.; JALALI, S. (2009). *Construção em Terra*. Universidade do Minho. Guimarães – Portugal.

VARUM, H., FIGUEIREDO, A., SILVEIRA, D., MARTINS, T., & COSTA, A. (2011). *Outputs from the research developed at the University of Aveiro regarding the mechanical characterization of existing adobe constructions in Portugal and proposals for rehabilitation and strengthening*. Informes de La Construcción, 63 (523), 127–142.

VEGA, P., JUAN, A., IGNACIO GUERRA, M., MORÁN, J. M., AGUADO, P. J., & LLAMAS, B. (2011). *Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain*. Construction and Building Materials, 25(7), 3020–3023.

VILLAMIZAR, M. C. N.; ARAQUE, V. S.; REYES, C. A. R.; & SILVA, R. S. (2012). *Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks*. Construction and Building Materials 36, (p.276–286).

Von technischen Zeichnungen, S. (2013). DIN 19051-3 IN. Bestandserhaltung in Archiven Und Bibliotheken, 349.



## **ANEXO – DADOS DOS ENSAIOS**

## Análise granulométrica

Malha (mm)	SB	SM	RCD	75%SM + 25%RCD
9.52	100	100	100	100
4.76	99.75	100	99.21	99.80
2	89.12	98.53	90.55	96.54
0.84	73.63	94.72	76.6	90.19
0.42	59.54	84.66	56.08	77.52
0.25	50.21	73.54	42.33	65.74
0.11	38.92	54.33	27.91	47.73
0.074	34.83	47.89	23.68	41.84
0.053	31.356	45.22	23.472	39.78
0.038	29.931	41.11	23.172	36.63
0.024	25.655	39.05	20.275	34.36
0.014	22.804	37	16.482	31.87
0.01	19.954	34.12	14.482	29.21
0.007	17.103	32.07	11.586	26.95
0.002	13.683	30.01	10.138	25.04
0.001	7.982	27.95	8.689	23.13

## Proctor

### Solo SB

peso molde	(g)	3904.10
altura do molde	(cm)	11.64
diâmetro molde	(cm)	10.13

NUMERO DA CÁPSULA			1	2	3	4	5	6
A	Peso da cápsula + Toma húmida	(g)	41.70	38.25	43.64	47.63	36.57	44.75
B	Peso da cápsula + Toma seca	(g)	40.03	36.80	41.28	45.00	34.46	41.60
C = A - B	Água na toma	(g)	1.67	1.45	2.36	2.63	2.11	3.15
D	Peso da Cápsula	(g)	15.86	16.15	15.74	17.20	15.58	15.53
E = B - D	Toma Seca	(g)	24.17	20.65	25.54	27.80	18.88	26.07
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	6.91	7.02	9.24	9.46	11.18	12.08
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	6.97		9.35		11.63	
	Peso molde + solo	(g)	5678.90		5850.40		5989.60	
	Peso solo	(g)	1774.80		1946.30		2085.50	
	baridade húmida	(g/cm <sup>3</sup> )	1.89		2.07		2.22	
	baridade seca	(g/cm <sup>3</sup> )	17.34		18.61		19.60	

NUMERO DA CÁPSULA			7	8	9	10
A	Peso da cápsula + Toma húmida	(g)	46.91	55.14	47.13	52.62
B	Peso da cápsula + Toma seca	(g)	43.08	49.54	42.29	47.12
C = A - B	Água na toma	(g)	3.83	5.60	4.84	5.50
D	Peso da Cápsula	(g)	15.63	13.03	12.83	12.73
E = B - D	Toma Seca	(g)	27.45	36.51	29.46	34.39
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	13.95	15.34	16.43	15.99
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	14.65		16.21	
	Peso molde + solo	(g)	5935.60		5918.30	
	Peso solo	(g)	2031.50		2014.20	
	baridade húmida	(g/cm <sup>3</sup> )	2.17		2.15	
	baridade seca	(kN/m <sup>3</sup> )	18.62		18.07	

## Solo SM

peso molde	(g)	2995.00
altura do molde	(cm)	11.64
diâmetro molde	(cm)	10.13

NUMERO DA CÁPSULA			1	2	3	4	5	6
A	Peso da cápsula + Toma húmida	(g)	35.34	42.49	42.84	46.49	72.94	37.97
B	Peso da cápsula + Toma seca	(g)	33.96	40.84	40.83	44.07	68.17	35.34
C = A - B	Água na toma	(g)	1.37	1.65	2.01	2.42	4.77	2.63
D	Peso da Cápsula	(g)	15.88	18.57	18.43	18.52	29.20	12.75
E = B - D	Toma Seca	(g)	18.09	22.27	22.40	25.55	38.97	22.59
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	7.60	7.43	8.99	9.48	12.24	11.64
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	7.51		9.24		11.94	
	Peso molde + solo	(g)	4719.30		4870.90		4978.70	
	Peso solo	(g)	1724.30		1875.90		1983.70	
	baridade húmida	(g/cm <sup>3</sup> )	1.84		2.00		2.11	
	baridade seca	(g/cm <sup>3</sup> )	1.71		1.83		1.88	

NUMERO DA CÁPSULA			7	8	9	10
A	Peso da cápsula + Toma húmida	(g)	60.49	55.13	77.08	72.67
B	Peso da cápsula + Toma seca	(g)	53.95	49.43	68.48	63.71
C = A - B	Água na toma	(g)	6.54	5.70	8.60	8.97
D	Peso da Cápsula	(g)	12.61	11.86	21.71	15.92
E = B - D	Toma Seca	(g)	41.33	37.57	46.77	47.79
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	15.83	15.16	18.40	18.77
W=100 x C/E	Teor de Humidade	(%)	15.50		18.58	
	Peso molde + solo	(g)	4968.60		4893.80	
	Peso solo	(g)	1973.60		1898.80	
	baridade húmida	(g/cm <sup>3</sup> )	2.10		2.02	
	baridade seca	(kN/m <sup>3</sup> )	1.82		1.71	

## Condutibilidade térmica

bloco	TC				TB				
	1	2	3	5	1	4	9	10	
T [°C]	24.5	24.5	24.5	24.5	25.2	25.2	25.2	25.2	
HR [%]	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	
Face superior [w/m.°C]	1ª medição	0.795	0.871	0.873	0.818	0.415	0.445	0.446	0.418
	2ª medição	0.795	0.852	0.884	0.832	0.426	0.465	0.477	0.404
	Média	0.840				0.437			
	D. P.	0.035				0.026			
Face lateral [w/m.°C]	1ª medição	0.893	0.943	1.06	1.08	0.496	0.492	0.442	0.482
	2ª medição	0.949	0.998	1.02	1.09	0.499	0.519	0.465	0.444
	Média	1.004				0.480			
	D. P.	0.071				0.027			
Média ind. [w/m.°C]	0.858	0.916	0.959	0.955	0.459	0.480	0.458	0.437	
Desvio P. ind. (w/m.°C)	0.076	0.067	0.095	0.150	0.045	0.032	0.016	0.034	
Média Lote [w/m.°C]	0.922				0.458				
Desvio P. Lote (w/m.°C)	0.101				0.034				

C				E				B			
1	2	3	4	1	6	29	30	8	19	27	30
26.8	26.8	26.8	26.8	21.4	21.3	21.3	21.3	23.1	21.3	21.3	23.1
64	64	64	64	63	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
0.905	0.874	0.968	0.92	0.562	0.484	0.523	0.514	0.988	0.988	0.933	0.906
0.922	0.846	0.946	0.872	0.508	0.517	0.512	0.508	0.947	1.01	0.97	0.937
0.907				0.516				0.960			
0.041				0.022				0.035			
0.706	0.752	0.749	0.761	0.538	0.508	0.541	0.519	1.02	1.04	1.06	1.03
0.626	0.779	0.738	0.789	0.527	0.489	0.527	0.529	1.03	1.09	1.05	0.98
0.738				0.522				1.038			
0.052				0.017				0.032			
0.790	0.813	0.850	0.836	0.534	0.500	0.526	0.518	0.996	1.032	1.003	0.963
0.147	0.057	0.124	0.073	0.023	0.016	0.012	0.009	0.037	0.044	0.062	0.054
0.822				0.519				0.999			
0.098				0.019				0.051			

## Ultra-sons

Bloco	TC1			TC2			TC3			TC5		
	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 24.5	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 24.5	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 24.5	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 24.5
direcção	8	tempo (µs)	vel (m/s)	8	tempo (µs)	vel (m/s)	8	tempo (µs)	vel (m/s)	8	tempo (µs)	vel (m/s)
AB	8.38	88	951.8	8.38	89.3	938.0	8.38	89.4	936.9	8.38	98.6	849.5
AC	25.87	212.2	1218.9	25.87	192.6	1343.0	25.87	183.7	1408.0	25.87	194.9	1327.1
AD	6.55	76.3	858.6	6.55	78.8	831.4	6.55	75	873.5	6.55	79.7	822.0
AE	25.33	214.5	1181.0	25.33	214.4	1181.6	25.33	182.9	1385.1	25.33	189.6	1336.1
AF	6.55	77.3	847.5	6.55	81.7	801.9	6.55	73.1	896.2	6.55	72.6	902.4
AG	25.33	213	1189.4	25.33	210.9	1201.2	25.33	184	1376.8	25.33	202.6	1250.4
AH	29.5	213.4	1382.4	29.5	211.9	1392.2	29.5	211.2	1396.8	29.5	214.5	1375.3
HG	6.55	73	897.4	6.55	82.3	796.0	6.55	79.3	826.1	6.55	80.1	817.9
HF	25.33	183.5	1380.6	25.33	190.4	1330.5	25.33	188.1	1346.8	25.33	196.7	1287.9
HE	6.55	71.4	917.6	6.55	79.3	826.1	6.55	74.3	881.7	6.55	73.7	888.9
HD	25.33	186.2	1360.5	25.33	241.3	1049.9	25.33	186	1362.0	25.33	207.4	1221.5
HC	8.38	90.6	924.5	8.38	87.2	960.6	8.38	91.8	912.4	8.38	72.2	1160.1
HB	25.87	191.8	1348.6	25.87	193.1	1339.5	25.87	189.3	1366.4	25.87	205.3	1259.9
HÁ	29.5	214.4	1375.9	29.5	211	1398.1	29.5	209.8	1406.1	29.5	211.3	1396.1
Média	1131.1			1099.3			1169.6			1135.4		
desv pad	219.9			238.1			254.9			225.0		

TB1			TB4			TB9			TB10		
e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 25.2	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 25.2	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 25.2	e (cm)	HR (%) 63.5	T (°C) 25.2
8	tempo (µs)	vel (m/s)	8	tempo (ms)	vel (m/s)		tempo (µs)	vel (m/s)		tempo (µs)	vel (m/s)
8.38	110	761.5	8.38	111.5	751.2	8.38	116.6	718.4	8.38	107.9	776.3
25.87	304.2	850.3	25.87	315.1	820.9	25.87	549.9	470.4	25.87	430.5	600.8
6.55	90.7	722.3	6.55	92.8	706.0	5.19	132.2	392.5	5.19	148	350.6
25.33	268.2	944.6	25.33	274.8	921.9	25.02	539.7	463.5	25.02	362.5	690.1
6.55	94.5	693.3	6.55	94.3	694.7	5.19	126	411.8	5.19	102.7	505.2
25.33	267.5	947.0	25.33	278.3	910.3	25.02	491	509.5	25.02	341.6	732.3
29.5	306	964.1	29.5	304.5	968.8	29.5	594.7	496.0	29.5	365.8	806.5
6.55	93.4	701.4	6.55	94.2	695.5	5.19	98.1	528.9	5.19	112.3	462.0
25.33	311.9	812.2	25.33	315.3	803.5	25.02	364.1	687.0	25.02	354.7	705.3
6.55	92.3	709.8	6.55	100.4	652.5	5.19	92.7	559.7	5.19	90.7	572.0
25.33	327.4	773.8	25.33	357	709.6	25.02	400.1	625.2	25.02	258.7	967.0
8.38	109.4	765.6	8.38	109.3	766.3	8.38	109.2	767.0	8.38	111.8	749.2
25.87	333.4	775.8	25.87	352.7	733.3	25.87	460.4	561.8	25.87	345.5	748.6
29.5	304.1	970.1	29.5	304.2	969.8	29.5	560.3	526.5	29.5	365.4	807.3
813.7			793.2			551.3			676.7		
102.9			108.4			112.1			162.0		

C1			C2			C3			C4		
e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)
	63.5	25.2		63.5	25.2		63.5	25.2		63.5	25.2
6.7	tempo (µs)	vel (m/s)	6.7	tempo (µs)	vel (m/s)	6.8	tempo (µs)	vel (m/s)	6.8	tempo (µs)	vel (m/s)
8.38	91.9	911.4	8.38	93.5	895.8	8.38	91.3	917.4	8.38	93	900.7
25.87	221.5	1167.7	25.87	230.2	1123.6	25.87	223.3	1158.3	25.87	240.1	1077.3
6.18	82.4	749.5	6.18	80.7	765.3	6.20	82.2	754.7	6.20	82.8	749.2
25.24	230.7	1094.0	25.24	223.4	1129.8	25.25	217.3	1161.8	25.25	248.4	1016.3
6.18	85.2	724.9	6.18	84.8	728.3	6.20	80	775.4	6.20	82.4	752.8
25.24	228.7	1103.6	25.24	238.3	1059.1	25.25	212.5	1188.0	25.25	245.6	1027.9
29.5	265.8	1109.9	29.5	233.5	1263.4	29.5	228.4	1291.6	29.5	234.7	1256.9
6.18	77.7	794.8	6.18	75.9	813.7	6.20	83.1	746.5	6.20	78.9	786.2
25.24	232.5	1085.5	25.24	232.5	1085.5	25.25	237.5	1063.0	25.25	234.6	1076.1
6.18	83.6	738.8	6.18	77.3	799.0	6.20	84.2	736.7	6.20	77.6	799.4
25.24	241.3	1045.9	25.24	247.2	1021.0	25.25	222.8	1133.1	25.25	229.1	1101.9
8.38	91.7	913.4	8.38	92.8	902.6	8.38	94.1	890.1	8.38	93.2	898.7
25.87	237	1091.4	25.87	226.2	1143.5	25.87	225.7	1146.0	25.87	237.5	1089.1
29.5	234.3	1259.1	29.5	230.8	1278.2	29.5	229.9	1283.2	29.5	236	1250.0
	985.0			1000.6			1017.6			984.5	
	176.6			182.9			206.4			172.4	

E1			E6			E29			E24		
e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)
	63.5	21.3		63.5	21.3		63.5	21.3		63.5	21.3
9.2	tempo (ms)	vel (m/s)	9.2	tempo (ms)	vel (m/s)	9.2	tempo (ms)	vel (m/s)	9.2	tempo (ms)	vel (m/s)
8.38	91.7	913.4	8.38	85.2	983.1	8.38	77.5	1080.8	8.38	117.5	712.9
25.87	304.7	848.9	25.87	301.2	858.7	25.87	291.6	887.0	25.87	301.2	858.7
6.93	71.9	964.4	6.93	74	937.0	6.93	71.3	972.5	6.93	106.9	648.6
25.43	279.3	910.7	25.43	294.5	863.7	25.43	289.7	878.0	25.43	292.7	869.0
6.93	74.3	933.2	6.93	71.2	973.9	6.93	70.2	987.7	6.93	107.7	643.8
25.43	277.4	916.9	25.43	296.6	857.5	25.43	294	865.1	25.43	287.7	884.1
29.5	353.1	835.5	29.5	353	835.7	29.5	307	960.9	29.5	325.9	905.2
6.93	62.9	1102.4	6.93	83.3	832.4	6.93	71.4	971.1	6.93	101.6	682.5
25.43	267.8	949.8	25.43	327	777.8	25.43	287.5	884.7	25.43	331.7	766.8
6.93	62.2	1114.8	6.93	80.6	860.3	6.93	77.8	891.3	6.93	106.9	648.6
25.43	273.7	929.3	25.43	318.2	799.3	25.43	286.3	888.4	25.43	319.6	795.8
8.38	77.9	1075.2	8.38	91.9	911.4	8.38	84.4	992.4	8.38	124	675.5
25.87	284.7	908.5	25.87	310.4	833.3	25.87	296.9	871.2	25.87	310.3	833.6
29.5	304.3	969.4	29.5	334.2	882.7	29.5	304.4	969.1	29.5	326.7	903.0
	955.2			871.9			935.7			773.4	
	85.9			60.6			63.9			102.4	

B27			B8			B11			B14		
e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)	e (cm)	HR (%)	T (°C)
	63.5	21.3		63.5	21.3		63.5	21.3		63.5	21.3
8.85	tempo (ms)	vel (m/s)	8.5	tempo (ms)	vel (m/s)	8.9	tempo (ms)	vel (m/s)	8.8	tempo (ms)	vel (m/s)
8.38	92.7	903.6	8.38	93.2	898.7	8.38	86.5	968.3	8.38	88.4	947.5
25.87	189.6	1364.2	25.87	200.2	1292.0	25.87	188.6	1371.4	25.87	194.8	1327.8
6.82	80.9	842.9	6.71	79.4	844.7	6.84	78.9	866.3	6.80	79.3	857.9
25.40	182.5	1392.0	25.37	200.6	1264.9	25.41	186.4	1363.1	25.40	211.5	1200.9
6.82	78.2	872.0	6.71	76.1	881.3	6.84	77.5	882.0	6.80	81.7	832.7
25.40	184	1380.6	25.37	201.2	1261.1	25.41	212.4	1196.2	25.40	214	1186.9
29.5	204.9	1439.7	29.5	212.7	1386.9	29.5	205.1	1438.3	29.5	212.5	1388.2
6.82	76.9	886.8	6.71	79.5	843.6	6.84	77.4	883.1	6.80	78.6	865.5
25.40	185.8	1367.3	25.37	196.2	1293.3	25.41	194.3	1307.7	25.40	210.1	1208.9
6.82	77.3	882.2	6.71	79.2	846.8	6.84	75.3	907.8	6.80	77	883.5
25.40	186.7	1360.7	25.37	214.5	1182.9	25.41	194.4	1307.0	25.40	194.6	1305.2
8.38	87.6	956.2	8.38	92.7	903.6	8.38	87.1	961.7	8.38	87.7	955.1
25.87	192.6	1343.0	25.87	199.8	1294.6	25.87	185.9	1391.4	25.87	194.8	1327.8
29.5	204.8	1440.4	29.5	215.6	1368.3	29.5	206.6	1427.9	29.5	210.7	1400.1
	1173.7			1111.6			1162.3			1120.6	
	256.9			223.0			234.2			218.2	

## Tubos de Karsten

Tempo (min <sup>0.5</sup> )	Tempo (h:m:s)	Tempo (min)	Quant água (ml)	Quant de água abs. (kg/m <sup>2</sup> )	Coef. de absorção de água (kg/(m <sup>2</sup> *min <sup>0.5</sup> ))
0.47	0:00:13	0.22	1	0.217	0.466
0.68	0:00:28	0.47	2	0.433	0.634
0.86	0:00:44	0.73	3	0.650	0.759
1.06	0:01:07	1.12	4	0.867	0.820
1.32	0:01:45	1.75	5	1.083	0.819
1.47	0:02:09	2.15	6	1.300	0.887
1.61	0:02:35	2.58	7	1.517	0.944
1.74	0:03:02	3.03	8	1.734	0.995
1.89	0:03:35	3.58	9	1.950	1.030
2.00	0:04:01	4.02	10	2.167	1.081
2.12	0:04:30	4.50	11	2.384	1.124
2.24	0:05:00	5.00	12	2.600	1.163
2.39	0:05:44	5.73	13	2.817	1.176
2.49	0:06:13	6.22	14	3.034	1.217
2.60	0:06:45	6.75	15	3.250	1.251
2.70	0:07:17	7.28	16	3.467	1.285
2.80	0:07:51	7.85	17	3.684	1.315
2.91	0:08:28	8.47	18	3.900	1.340
3.02	0:09:07	9.12	19	4.117	1.364
3.09	0:09:34	9.57	20	4.334	1.401
3.18	0:10:08	10.13	21	4.551	1.430
3.27	0:10:40	10.67	22	4.767	1.460
3.35	0:11:15	11.25	23	4.984	1.486
3.44	0:11:50	11.83	24	5.201	1.512
3.53	0:12:27	12.45	25	5.417	1.535
3.61	0:13:00	13.00	26	5.634	1.563
3.69	0:13:36	13.60	27	5.851	1.586
3.76	0:14:10	14.17	28	6.067	1.612
3.84	0:14:46	14.77	29	6.284	1.635
3.92	0:15:20	15.33	30	6.501	1.660
3.99	0:15:55	15.92	31	6.717	1.684
4.06	0:16:30	16.50	32	6.934	1.707
4.15	0:17:11	17.18	33	7.151	1.725
4.22	0:17:47	17.78	34	7.368	1.747
4.29	0:18:24	18.40	35	7.584	1.768
4.36	0:19:01	19.02	36	7.801	1.789
4.44	0:19:44	19.73	37	8.018	1.805
4.51	0:20:21	20.35	38	8.234	1.825
4.58	0:20:56	20.93	39	8.451	1.847
4.64	0:21:34	21.57	40	8.668	1.866
4.71	0:22:10	22.17	41	8.884	1.887
4.77	0:22:43	22.72	42	9.101	1.910
4.83	0:23:20	23.33	43	9.318	1.929
4.90	0:24:00	24.00	44	9.534	1.946
4.96	0:24:37	24.62	45	9.751	1.965
5.02	0:25:13	25.22	46	9.968	1.985
5.08	0:25:50	25.83	47	10.185	2.004
5.15	0:26:30	26.50	48	10.401	2.021
5.22	0:27:15	27.25	49	10.618	2.034
5.28	0:27:53	27.88	50	10.835	2.052
5.34	0:28:30	28.50	51	11.051	2.070
5.40	0:29:09	29.15	52	11.268	2.087
5.46	0:29:47	29.78	53	11.485	2.104
5.51	0:30:23	30.38	54	11.701	2.123
5.57	0:31:00	31.00	55	11.918	2.141
5.62	0:31:38	31.63	56	12.135	2.158
5.68	0:32:18	32.30	57	12.352	2.173
5.74	0:32:54	32.90	58	12.568	2.191
5.79	0:33:32	33.53	59	12.785	2.208
5.85	0:34:11	34.18	60	13.002	2.224
5.90	0:34:48	34.80	61	13.218	2.241
5.95	0:35:25	35.42	62	13.435	2.258
6.00	0:36:03	36.05	63	13.652	2.274
6.06	0:36:45	36.75	64	13.868	2.288
6.12	0:37:29	37.48	65	14.085	2.301
6.17	0:38:05	38.08	66	14.302	2.318
6.22	0:38:44	38.73	67	14.518	2.333
6.28	0:39:23	39.38	68	14.735	2.348
6.33	0:40:01	40.02	69	14.952	2.364
6.38	0:40:41	40.68	70	15.169	2.378
6.43	0:41:18	41.30	71	15.385	2.394
6.48	0:41:58	41.97	72	15.602	2.408
6.53	0:42:37	42.62	73	15.819	2.423
6.58	0:43:15	43.25	74	16.035	2.438
6.63	0:43:54	43.90	75	16.252	2.453
6.68	0:44:35	44.58	76	16.469	2.466
6.72	0:45:13	45.22	77	16.685	2.481
6.77	0:45:50	45.83	78	16.902	2.497
6.82	0:46:30	46.50	79	17.119	2.510
6.87	0:47:10	47.17	80	17.335	2.524
6.92	0:47:52	47.87	81	17.552	2.537
6.97	0:48:32	48.53	82	17.769	2.551
7.01	0:49:12	49.20	83	17.986	2.564
7.06	0:49:52	49.87	84	18.202	2.578
7.11	0:50:32	50.53	85	18.419	2.591
7.15	0:51:11	51.18	86	18.636	2.605
7.20	0:51:50	51.83	87	18.852	2.619
7.25	0:52:31	52.52	88	19.069	2.631
7.30	0:53:14	53.23	89	19.286	2.643
7.34	0:53:53	53.88	90	19.502	2.657
7.39	0:54:33	54.55	91	19.719	2.670
7.43	0:55:13	55.22	92	19.936	2.683
7.47	0:55:52	55.87	93	20.152	2.696
7.52	0:56:30	56.50	94	20.369	2.710
7.56	0:57:11	57.18	95	20.586	2.722
7.61	0:57:52	57.87	96	20.803	2.735
7.66	0:58:37	58.62	97	21.019	2.745
7.70	0:59:16	59.27	98	21.236	2.758
7.75	1:00:00	60.00	99	21.453	2.770

		4ml		Tempo				Coef				
		Tempo		5 min	10 min	15 min	30 min	4 ml	5 min	10 min	15 min	30 min
TC1	1	-	-	0	0	0.1	0.3	-	0.00	0.00	0.01	0.01
	2	-	-	0.5	0.6	0.7	0.9	-	0.05	0.04	0.04	0.04
TC2	1	-	-	0.5	0.7	0.8	1	-	0.05	0.05	0.04	0.04
	2	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
TC3	1	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
TC5	1	-	-	0.1	0.2	0.3	0.5	-	0.01	0.01	0.02	0.02
	2	-	-	0	0.1	0.2	0.4	-	0.00	0.01	0.01	0.02
MÉDIA								-	0.01	0.01	0.01	0.02
DESV P								-	0.02	0.02	0.02	0.01
TB1	1	00:07:10	7.17	3	5	7	12.2	0.32	0.29	0.34	0.39	0.48
	2	00:06:50	6.83	3.2	5.4	7.9	14.4	0.33	0.31	0.37	0.44	0.57
TB4	1	00:06:10	6.17	3.3	5.8	8.3	15.5	0.35	0.32	0.40	0.46	0.61
	2	00:16:50	16.83	1.5	2.7	3.8	7.1	0.21	0.15	0.19	0.21	0.28
TB9	1	00:03:41	3.68	7	10.3	14.2	26.2	0.45	0.68	0.71	0.79	1.04
	2	00:07:50	7.83	3	5.8	7.9	13	0.31	0.29	0.40	0.44	0.51
TB10	1	00:01:30	1.50	11	15	19.5	33.3	0.71	1.07	1.03	1.09	1.32
	2	00:05:30	5.50	3.7	7	10.1	18.6	0.37	0.36	0.48	0.57	0.74
MÉDIA								0.38	0.43	0.49	0.55	0.69
DESV P								0.15	0.30	0.26	0.27	0.33
C3	1	-	-	0	0	0.1	0.3	-	0.00	0.00	0.01	0.01
	2	-	-	0.5	0.6	0.7	0.9	-	0.05	0.04	0.04	0.04
C6	1	-	-	0.5	0.7	0.8	1	-	0.05	0.05	0.04	0.04
	2	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
C10	1	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	-	-	0	0	0	0.1	-	0.00	0.00	0.00	0.00
C15	1	-	-	0.1	0.2	0.3	0.5	-	0.01	0.01	0.02	0.02
	2	-	-	0	0.1	0.2	0.4	-	0.00	0.01	0.01	0.02
MÉDIA								-	0.01	0.01	0.01	0.02
DESV P								-	0.02	0.02	0.02	0.01
B10	1	00:05:00	5.00	4	6	8	13.7	0.39	0.39	0.41	0.45	0.54
	2	00:05:00	5.00	4	6.1	8.3	14.4	0.39	0.39	0.42	0.46	0.57
B23	1	00:03:05	3.08	5.3	8.8	11.5	19.3	0.49	0.51	0.60	0.64	0.76
	2	00:03:17	3.28	4.6	7.6	9.9	17.1	0.48	0.45	0.52	0.55	0.68
B26	1	00:05:15	5.25	3.8	6.2	8.4	14.6	0.38	0.37	0.42	0.47	0.58
	2	00:05:10	5.17	4	6.2	8.4	14.4	0.38	0.39	0.42	0.47	0.57
B32	1	00:15:00	15.00	1.8	2.9	4	7.2	0.22	0.17	0.20	0.22	0.28
	2	00:11:30	11.50	2.3	3.9	4.8	8.8	0.26	0.22	0.27	0.27	0.35
MÉDIA								0.37	0.36	0.41	0.44	0.54
DESV P								0.09	0.11	0.13	0.14	0.16
E7	1	00:01:00	1.00	14.6	25	35.5	62.9	0.87	1.41	1.71	1.99	2.49
	2	00:00:30	0.50	22.8	38.1	53.5	93	1.23	2.21	2.61	2.99	3.68
E10	1	00:00:30	0.50	24.5	36	56.3	96.8	1.23	2.37	2.47	3.15	3.83
	2	00:00:30	0.50	23	40	55	92	1.23	2.23	2.74	3.08	3.64
E22	1	00:00:43	0.72	22	34	53.3	62.9	1.02	2.13	2.33	2.98	2.49
	2	00:00:35	0.58	20	34	48	81	1.13	1.94	2.33	2.69	3.20
E26	1	00:01:00	1.00	8	16.5	24	44.8	0.87	0.78	1.13	1.34	1.77
	2	00:00:37	0.62	21.6	33.8	46.6	81.5	1.10	2.09	2.32	2.61	3.22
MÉDIA								1.08	1.90	2.20	2.60	3.04
DESV P								0.15	0.54	0.53	0.63	0.72

# Capilaridade

		E27			E23			E28			E29		
t (min)	t (min <sup>0.5</sup> )	m caixa (g)		82	m caixa (g)		91.5	m caixa (g)		82	m caixa (g)		82
		m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )
0	0	6768.2	6686.2	0	6680	6588.5	0	6595.4	6513.4	0	6656.6	6574.6	0
5	2.236068	7164	7082	9.583535	7074.8	6983.3	9.559322	7001.5	6919.5	9.83293	7047.6	6965.6	9.467312
10	3.162278	7302.1	7220.1	12.92736	7215.6	7124.1	12.96852	7163.5	7081.5	13.75545	7201.9	7119.9	13.20339
15	3.872983	7414.4	7332.4	15.64649	7336.9	7245.4	15.90557	7279.8	7197.8	16.57143	7321.2	7239.2	16.09201
30	5.477226	7631.9	7549.9	20.91283	7562.9	7471.4	21.37772	7531.1	7449.1	22.65617	7565.1	7483.1	21.99758
60	7.745967	7782.9	7700.9	24.56901	7703.2	7611.7	24.77482	7650.4	7568.4	25.54479	7702.9	7620.9	25.33414
120	10.95445	7795	7713	24.86199	7712.6	7621.1	25.00242	7664.3	7582.3	25.88136	7717.3	7635.3	25.68281
180	13.41641	7795.7	7713.7	24.87893	7714.4	7622.9	25.046	7666.5	7584.5	25.93462	7717.2	7635.2	25.68039
1440	37.94733	7821.8	7739.8	25.5109	7737.1	7645.6	25.59564	7699.7	7617.7	26.7385	7749.5	7667.5	26.46247

		B12			B19			B22			B29		
t (min)	t (min <sup>0.5</sup> )	m caixa (g)		83	m caixa (g)		91.5	m caixa (g)		82	m caixa (g)		81
		m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )
0	0	7369.2	7286.2	0	7317.2	7225.7	0	7500	7418	0	7354	7273	0
5	2.236068	7537.4	7454.4	4.072639	7478.7	7387.2	3.910412	7649.3	7567.3	3.615012	7536.2	7455.2	4.411622
10	3.162278	7583.3	7500.3	5.184019	7526.8	7435.3	5.075061	7695.4	7613.4	4.731235	7590.2	7509.2	5.719128
15	3.872983	7625.8	7542.8	6.213075	7564.6	7473.1	5.990315	7730.6	7648.6	5.583535	7632.3	7551.3	6.738499
30	5.477226	7696.3	7613.3	7.920097	7639.7	7548.2	7.808717	7801.1	7719.1	7.290557	7716.8	7635.8	8.784504
60	7.745967	7792.7	7709.7	10.25424	7754.9	7663.4	10.59806	7898.6	7816.6	9.651332	7831	7750	11.54964
120	10.95445	7936.6	7853.6	13.7385	7914.5	7823	14.46247	8051.4	7969.4	13.35109	7987.7	7906.7	15.34383
180	13.41641	7997.3	7914.3	15.20823	7980.1	7888.6	16.05085	8107.8	8025.8	14.71671	8038.4	7957.4	16.57143
240	15.49193	8044.5	7961.5	16.35109	8023.7	7932.2	17.10654	8154.5	8072.5	15.84746	8078.4	7997.4	17.53995
300	17.32051	8065.2	7982.2	16.8523	8061.2	7969.7	18.01453	8197.4	8115.4	16.8862	8098.5	8017.5	18.02663
420	20.4939	8073	7990	17.04116	8070	7978.5	18.2276	8226.4	8144.4	17.58838	8102.5	8021.5	18.12349
480	21.9089	8076	7993	17.1138	8073.3	7981.8	18.30751	8240.1	8158.1	17.9201	8106.8	8025.8	18.2276
1440	37.94733	8098.9	8015.9	17.66828	8103.7	8012.2	19.04358	8267.9	8185.9	18.59322	8127.2	8046.2	18.72155

		TB1			TB4			TB9			TB10		
t (min)	t (min <sup>0.5</sup> )	m caixa (g)		336	m caixa (g)		151	m caixa (g)		363.8	m caixa (g)		151
		m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )
0	0.00	6654.2	6654.2	0	6757.4	6757.4	0	6709.6	6709.6	0	6699.4	6699.4	0
5	2.24	6799.6	6799.6	3.075621	6902.3	6902.3	5.248017	6884.7	6884.7	4.875727	6863.2	6863.2	4.420941
10	3.16	6852.7	6852.7	4.198837	6962.6	6962.6	6.523533	6951.3	6951.3	6.284506	6929.4	6929.4	5.821259
15	3.87	6900.2	6900.2	5.203596	6997	6997	7.25119	7014.4	7014.4	7.619249	6983.4	6983.4	6.963511
30	5.48	7012.6	7012.6	7.581174	7097	7097	9.366473	7133.9	7133.9	10.14701	7089.4	7089.4	9.205711
60	7.75	7155.9	7155.9	10.61237	7230.5	7230.5	12.19038	7286.9	7286.9	13.3834	7237.3	7237.3	12.33421
120	10.95	7319.5	7319.5	14.07298	7436.2	7436.2	16.54151	7396.1	7396.1	15.69328	7391.5	7391.5	15.59598
180	13.42	7333.9	7333.9	14.37758	7449.9	7449.9	16.83131	7396.9	7396.9	15.71021	7396.7	7396.7	15.70598
1440	37.95	7350.1	7350.1	14.72025	7473	7473	17.31994	7422.4	7422.4	16.2496	7412.7	7412.7	16.04442

		C9			C10			C11			C12		
t (min)	t (min <sup>0.5</sup> )	m caixa (g)		143	m caixa (g)		145	m caixa (g)		160	m caixa (g)		112
		m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )
0	0	6164.5	6164.5	0	5929.1	5929.1	0	5944.8	5944.8	0	5904.7	5904.7	0
5	2.236068	6264.1	6264.1	2.106822	6021.9	6021.9	1.962983	6034	6034	1.886832	5985.6	5985.6	1.711264
10	3.162278	6290.9	6290.9	2.673718	6055.9	6055.9	2.682179	6063.9	6063.9	2.519302	6011.2	6011.2	2.252776
15	3.872983	6313	6313	3.141195	6074.6	6074.6	3.077737	6071.8	6071.8	2.686409	6031.3	6031.3	2.677948
30	5.477226	6360.1	6360.1	4.137493	6122.8	6122.8	4.097303	6102.1	6102.1	3.32734	6068.1	6068.1	3.456372
60	7.745967	6417.4	6417.4	5.349551	6208.6	6208.6	5.912216	6163.6	6163.6	4.628239	6138.8	6138.8	4.951877
120	10.95445	6496.1	6496.1	7.014278	6314.7	6314.7	8.156531	6261.8	6261.8	6.705447	6237.8	6237.8	7.046007
180	13.41641	6551.3	6551.3	8.181914	6393.3	6393.3	9.819143	6323.8	6323.8	8.016922	6302.2	6302.2	8.40825
240	15.49193	6580.8	6580.8	8.805923	6420.7	6420.7	10.39873	6352.8	6352.8	8.630354	6344.6	6344.6	9.30513
1440	37.94733	6980.3	6980.3	17.25648	6875.2	6875.2	20.01269	6811.2	6811.2	18.32681	6820.8	6820.8	19.37811

		TC1			TC2			TC3			TC5		
		m caixa (g)		143	m caixa (g)		143	m caixa (g)		143	m caixa (g)		143
t (min)	t (min <sup>0.5</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )	m total (g)	m bloco(g)	w (kg/m <sup>2</sup> )
0	0	6971.6	6971.6	0	7004.4	7004.4	0	7358.1	7358.1	0	6966	6966	0
5	2.236068	7066.5	7066.5	2.007403	7103.4	7103.4	2.09413	7448.5	7448.5	1.912216	7068.7	7068.7	2.172396
10	3.162278	7094.2	7094.2	2.593337	7133.9	7133.9	2.739291	7461.1	7461.1	2.178741	7086.2	7086.2	2.54257
15	3.872983	7118.7	7118.7	3.111581	7161.1	7161.1	3.314648	7482.4	7482.4	2.629297	7105.2	7105.2	2.944474
30	5.477226	7171.8	7171.8	4.234796	7214.4	7214.4	4.442094	7519.9	7519.9	3.422528	7147.2	7147.2	3.832893
60	7.745967	7383.5	7383.5	8.71285	7427	7427	8.939186	7735	7735	7.972501	7378.6	7378.6	8.727657
120	10.95445	7468.3	7468.3	10.50661	7512.1	7512.1	10.73929	7820.9	7820.9	9.789529	7466.7	7466.7	10.59122
180	13.41641	7532.4	7532.4	11.86251	7575.3	7575.3	12.07615	7890.2	7890.2	11.25542	7545.1	7545.1	12.2496
240	15.49193	7597.8	7597.8	13.2459	7664.1	7664.1	13.95452	7964.2	7964.2	12.82073	7625.8	7625.8	13.95664
300	17.32051	7643	7643	14.20201	7716.1	7716.1	15.05447	8001.7	8001.7	13.61396	7669.9	7669.9	14.88948
1440	37.94733	7677.4	7677.4	14.92967	7763	7763	16.04654	8041.9	8041.9	14.4643	7709.7	7709.7	15.73136

## Compressão

Lote	Seco							Saturado						
	Numero	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura (cm)	Força colapso (kN)	σc (MPa)			Numero	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura (cm)	Força colapso (kN)	σc (MPa)		
					Indiv.	Média	Desvio padrão					Indiv.	Média	Desvio padrão
B	4	201.6	18	86	4.27	4.22	0.57	2	198.1	18.5	41	2.07	2.36	0.25
	9	199.5	18	71	3.56			5	198.8	18.9	52	2.62		
	13	200.2	19	99	4.95			15	199.5	18.6	45	2.26		
	23	198.8	18.5	82	4.12			16	196	18.5	49	2.50		
E	11	197.4	19.2	20	1.01	0.88	0.09	5	198.8	19.5	11.677	0.59	0.54	0.04
	16	198.1	19.3	17	0.86			8	201.6	19.5	10.541	0.52		
	17	196	19.4	16	0.82			11	203	19.9	11.017	0.54		
	18	199.5	19.2	17	0.85			12	203	19.8	9.95	0.49		
TC	234.05	16	72	3.08	3.15	0.28								
	227.075	16	68	2.99										
	244.125	15.5	87	3.56										
	248.775	16.3	74	2.97										
TB	240.25	15.5	196	8.16	8.88	0.50	232.5	16.5	172	7.40	9.50	2.09		
	234.825	16	210	8.94			236.375	16.1	271	11.46				
	234.05	16	218	9.31			236.375	15.5	263	11.13				
	234.05	15.5	213	9.10			231.725	15.6	186	8.03				
C	227.25	13.8	56	2.46	2.25	0.20								
	229.5	14.7	46	2.00										
	228.75	13.8	54	2.36										
	229.5	14.5	50	2.18										

## Estabilidade dos Blocos Após Envelhecimento acelerado

		B				E					
		8	11	26	27	1	4	6	24		
1º ciclo	seco	0	massa [g]	7346.9	7364.6	7392	7343.1	6591.2	6550.1	6521	6603.7
		1ª dim [mm]	85.7	89.66	90.73	85.56	92.77	92.2	92.7	92.45	
		2ª dim [mm]	87.96	86.86	87.43	89.53	92.66	92.47	92.9	93	
		média	86.83	88.26	89.08	87.545	92.715	92.335	92.8	92.725	
	humido	6	massa [g]	7980.4	8036.4	8081.9	8022.8	7568.2	7539.8	7524.9	7578
		1ª dim [mm]	85.6	88.6	90.34	87.17	92.91	93.36	93.1	93.15	
		2ª dim [mm]	87.9	87.9	87.27	88.1	93.13	92.65	93.58	92.97	
		média	86.75	88.25	88.805	87.635	93.02	93.005	93.34	93.06	
2º ciclo	seco	48	massa [g]	7358.7	7381.7	7418.7	7362	6574.1	6527.6	6488.7	6582.5
		1ª dim [mm]	86.54	88.4	91.1	88.7	93.08	93.03	92.95	92.7	
		2ª dim [mm]	87.01	88	88.5	88	92.63	93	93.61	92.84	
		média	86.775	88.2	89.8	88.35	92.855	93.015	93.28	92.77	
	humido	54	massa [g]	7959	8022.7	8068.5	8014.8	7586.9	7541.1	7486.6	7576.7
		1ª dim [mm]	86.32	88.41	90.6	87.3	92.9	92.87	93.23	93.8	
		2ª dim [mm]	86.92	88.15	87.76	88.15	93.63	93.05	93.03	93.08	
		média	86.62	88.28	89.18	87.725	93.265	92.96	93.13	93.44	
3º ciclo	seco	96	massa [g]	7327.7	7348.3	7385.1	7329.7	6544.7	6480.8	6400.6	6532.3
		1ª dim [mm]	86.94	88.92	90.36	88.48	93.12	93.03	93.34	93.33	
		2ª dim [mm]	87.4	87.66	87.58	88.42	93.3	92.99	93.24	93.36	
		média	87.17	88.29	88.97	88.45	93.21	93.01	93.29	93.345	
	humido	102	massa [g]	7958.9	8015	8055.3	8002.8	7596.8	7519.8	7446.4	7570.8
		1ª dim [mm]	86.52	90.03	89.51	87.2	93.27	93.04	93.3	93.69	
		2ª dim [mm]	87.15	87.68	90.37	90.32	93.63	93.26	93.81	92.98	
		média	86.835	88.855	89.94	88.76	93.45	93.15	93.555	93.335	
4º ciclo	seco	168	massa [g]	7349.4	7373.2	7408	7351.8	6549.1	6454.6	6361	6520.9
		1ª dim [mm]	88.25	88.72	90.23	88.2	93.87	93.18	93.34	93.8	
		2ª dim [mm]	85.5	87.8	87.73	88.35	92.97	93.42	93.82	93.4	
		média	86.875	88.26	88.98	88.275	93.42	93.3	93.58	93.6	
	humido	174	massa [g]	7946	8014.5	8055.4	8000.5	7593	7501	7399.3	7555.5
		1ª dim [mm]	85.46	88.5	90.47	88.35	93.46	92.88	93.46	94.1	
		2ª dim [mm]	88	88.1	88.02	88.3	94.01	93.08	94.13	93	
		média	86.73	88.3	89.245	88.325	93.735	92.98	93.795	93.55	
5º ciclo	seco	216	massa [g]	7352.8	7380.2	7415	7354.5	6538.7	6428	6305.5	6498.7
		1ª dim [mm]	85.44	88.66	90.38	87.85	93.24	92.46	93.38	94.38	
		2ª dim [mm]	87.99	88.2	87.85	88.8	93.37	93.03	94.51	93.02	
		média	86.715	88.43	89.115	88.325	93.305	92.745	93.945	93.7	
	humido	222	massa [g]	7945.6	8010	8049	7997.8	7573.5	7471.6	7358.9	7529.1
		1ª dim [mm]	85.41	88.66	90.82	87.8	93.58	92.93	93.83	94.96	
		2ª dim [mm]	88	87.9	87.42	88.51	93.68	93.65	94.34	92.86	
		média	86.705	88.28	89.12	88.155	93.63	93.29	94.085	93.91	
6º ciclo	seco	264	massa [g]	7320.3	7343.1	7376.4	7321.3	6482.4	6364.8	-	6438.7
		1ª dim [mm]	85.45	88.07	90.26	88.03	93.31	92.8	-	93.37	
		2ª dim [mm]	87.9	88.45	87.6	87.49	92.82	93.35	-	92.8	
		média	86.675	88.26	88.93	87.76	93.065	93.075	-	93.085	
	humido	270	massa [g]	7949.4	8014	8048.5	8000.5	7532.9	7406.1	-	7472.5
		1ª dim [mm]	85	87.88	90.27	88.4	93.68	93.56	-	94.11	
		2ª dim [mm]	88	88.55	87.55	87.99	93.51	94.2	-	93.45	
		média	86.5	88.215	88.91	88.195	93.595	93.88	-	93.78	

## Erosão a seco

		Face superior						Face superior					
Ident.	Massa i [g]	Massa f [g]	S [cm <sup>2</sup> ]	CA [cm <sup>2</sup> /g]			Massa f [g]	S [cm <sup>2</sup> ]	CA [cm <sup>2</sup> /g]				
				Valor ind.	Média	Desv. P.			Valor ind.	Média	Desv. P.		
C	1	5754.2	5739.2	194.25	12.95	9.83	2.46	5717.1	213.5	9.66	7.37	1.77	
	2	5821.8	5804.6	176.75	10.28			5786.3	140	7.65			
	3	5925.7	5907.2	166.25	8.99			5884.3	154	6.72			
	4	6042.4	6019.2	164.5	7.09			5980	213.5	5.45			
TC	8	7102.6	7085.8	210	12.50	13.20	0.49	7063.9	210	9.59	8.44	1.07	
	10	7147.6	7132.2	210	13.64			7105.1	210	7.75			
	14	7232.4	7216.7	210	13.38			7188.1	210	7.34			
	17	7069	7053.2	210	13.29			7030.1	210	9.09			
TB	1	6652.1	6644.4	210	27.27	22.55	9.93	6629.3	210	13.91	12.91	3.06	
	4	6760.8	6749.8	210	19.09			6729.5	210	10.34			
	9	6695.8	6689.5	210	33.33			6669.7	210	10.61			
	10	6704.4	6684.4	210	10.50			6671.9	210	16.80			
B	1	7014.2	6972.6	206.5	4.96	9.74	3.89	6929.2	206.5	4.76	6.70	1.55	
	7	7244.4	7230.1	206.5	14.44			7198.4	206.5	6.51			
	14	7454.5	7434.4	206.5	10.27			7410.2	206.5	8.53			
	30	7136.8	7114.6	206.5	9.30			7085	206.5	6.98			
E	8	6615.5	6411.9	189	0.93	1.09	0.32	6061.3	206.5	0.59	0.76	0.21	
	9	6624.8	6433.7	196	1.03			6148.6	206.5	0.72			
	13	6724.1	6603.6	189	1.57			6410.3	206.5	1.07			
	15	6625.4	6395.1	196	0.85			6082.1	206.5	0.66			

## Abrasão húmida

		Face superior					Face inferior				
Ident.	Massa i [g]	Massa f [g]	CAH [%]			Massa f [g]	CAH [%]				
			Valor ind.	Média	Desv. P.		Valor ind.	Média	Desv. P.		
B	10	3697	3675.3	0.24	0.21	0.02	3684.1	0.35	0.27	0.06	
	21	3603.1	3588.2	0.21			3595.9	0.20			
	25	3444.1	3429.1	0.18			3435.3	0.26			
	32	3648.8	3631.9	0.20			3639.2	0.26			
E	7	3370.7	3335.5	1.04	1.11	0.06	3303.3	0.97	1.12	0.19	
	10	3476	3439.1	1.06			3394.2	1.31			
	22	3333.6	3294.7	1.17			3253.4	1.25			
	26	3230	3192.6	1.16			3162.5	0.94			