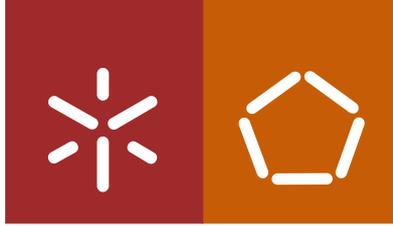


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria Helena de Araújo

**Comportamento térmico de blocos de
terra comprimida ativados alcalinamente**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria Helena de Araújo

**Comportamento térmico de blocos de
terra comprimida ativados alcalinamente**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Dinis Leitão
e da
Professora Sandra Silva

julho de 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Maria Helena de Araújo

Endereço eletrónico: helen_a_de_araujo21@hotmail.com

Telefone: 912430519

Número do Bilhete de Identidade: 13740190

Título dissertação /tese

Comportamento térmico de blocos de terra comprimida ativados alcalinamente

Orientador(es):

Professor Dinis Leitão

Professora Sandra Silva

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido à contribuição de inúmeras pessoas, que de uma forma ou de outra contribuíram para tornar este trabalho possível. Cabe-me agora expressar o meu sentimento de profundo agradecimento que nutro por todos aqueles que, de uma forma ou de outra, mais ou menos marcadamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dinis Leitão, pelo apoio, consideração, auxílio, partilha de conhecimentos, disponibilidade e amizade demonstrada durante a realização deste trabalho. À minha coorientadora, Professora Sandra Silva por todo o acompanhamento e apoio prestado. A ambos agradeço tudo o que me ensinaram enquanto professores e todas as sugestões e conselhos que me deram ao longo deste trabalho.

Ao José Amarílio e ao Edgar Soares pela partilha de conhecimentos, por todo o apoio prestado aquando da realização dos ensaios, e por toda a disponibilidade que sempre demonstraram.

Agradeço aos meus amigos e colegas, companheiros de percurso, pelas palavras de incentivo ao longo de todo o curso. Em especial à minha companheira de sempre, a Liliana, por toda a amizade, lealdade e companheirismo.

Um agradecimento especial ao meu padrinho que não está presente fisicamente nesta fase final mas que foi sempre um bom conselheiro ao longo do meu percurso.

Por último, à minha mãe e ao mano Paulo, pelo incentivo, pelo orgulho demonstrado e por serem a base onde me sustento.

Resumo

A construção em terra tem vindo a ganhar uma nova expressão quer em termos arquitetónicos quer na construção civil. Esta forma de construção está presente em todo o mundo e representa uma das formas de construção mais antigas.

É notória uma crescente preocupação por reinventar e renovar técnicas antigas de construção em terra, bem como das formas de melhorar a terra como material de construção. Uma vez que uma das principais limitações da construção em terra é a inadequabilidade de alguns solos disponíveis localmente, como é o caso do solo residual granítico do Minho, surge assim a estabilização dos mesmos como forma de melhorar as suas características.

A construção em terra é muito versátil visto permitir a utilização de muitas técnicas diferentes, sendo a alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC) uma das técnicas mais recentes e foi a que serviu de base para este trabalho. Neste caso, a estabilização dos BTC foi feita através da ativação alcalina de cinzas volantes.

Com este trabalho pretende-se estudar o comportamento termoenergético desta nova técnica, de forma a que, em conjunto com todos os outros trabalhos já desenvolvidos ou em desenvolvimento, relacionados com os BTC com SRG, seja possível obter-se uma caracterização completa desta técnica. Assim sendo, foram efetuados testes térmicos a uma parede simples de BTC com junta seca, para caracterização da sua resistência térmica. Para que seja possível compreender a variação do comportamento termoenergético dos BTC em conjunto com outros elementos construtivos, também foram realizados ensaios térmicos numa parede simples com junta preenchida por betume e numa parede com junta preenchida por betume e com 2cm de isolamento térmico (aglomerado de cortiça) pelo exterior.

Os resultados obtidos permitiram caracterizar/ calcular a resistência térmica dos BTC, assim como, compreender a variação do comportamento energético dos BTC em conjunto com outros elementos construtivos e por comparação com outras soluções construtivas correntes.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida; comportamento termoenergético; resistência térmica; ensaios térmicos; ativação alcalina; cinzas volantes.

Abstract

The earth construction has gained a new expression, both in architectural terms and in construction. This construction method is present throughout the world and is one of the oldest construction forms.

It is evident a growing concern with reinvent and renew old building techniques in earth, as well as ways to improve the land as a building material. Since one of the main limitations of the earth construction is the inadequacy of some locally available soils, as is the case of granite residual soil of Minho, thus arises stabilization thereof in order to improve their characteristics.

The earth construction is very versatile as it allows the use of many different techniques, and the masonry compressed earth blocks (BTC) one of the latest techniques and was used as the basis for this work. In this case, the stabilization of BTC was made by activation of alkaline fly ashes.

This work is intended to study the thermoenergetic behavior of this new technique, so that, together with all the other work already developed or under development, related to the BTC with SRG, it is possible to obtain a complete characterization of this technique. Thus, thermal tests were performed at a single wall BTC with lute, to characterize its thermal resistance. To be able to understand the behavior of variation thermoenergetic BTC in conjunction with other construction elements, thermal tests were also performed with a single wall board filled with bitumen and a wall with gasket filled with bitumen and thermal insulation 2cm (corkboard) from the outside.

The results were used to characterize / estimate the thermal resistance of the BTC as well as understand the variation of the energy behavior of BTC in conjunction with other construction elements and by comparison with other common constructive solutions.

Keywords: compressed earth blocks; thermoenergetic behavior; heat resistance; thermal tests; alkaline activation; fly ashes.

Simbologia

BTC	Bloco de terra comprimida
SRG	Solo residual granítico
ASTM	American Society for Testing and Materials
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNCHS	United Nations Center for Human Settlements
REH	Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação
CO ₂	Dióxido de carbono
SiO ₂	Dióxido de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
NaOH ₂	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₂	Silicato de sódio
Ca	Cálcio
Na	Sódio
Cm	Centímetro
M	Metro
W	Watts
°C	Graus celsius
EPS	Poliestireno expandido

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Simbologia.....	ix
INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E ORGANIZAÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação e objetivos do trabalho	3
1.3 Metodologia	4
1.4 Organização do documento	4
ESTADO DA ARTE – CONSTRUÇÕES EM TERRA	7
2.1 Introdução	7
2.2 Enquadramento histórico das construções em terra.....	8
2.3 Construções em terra em Portugal	12
2.4 Vantagens das construções em terra	13
2.5 Sistemas de construção em terra	15
2.5.1 Monolítica	15
2.5.2 Por unidades	18
2.5.3 Por enchimento e revestimento	22
2.6 Caracterização dos solos.....	23
2.6.1 Ensaios de campo	24
2.6.2 Ensaios de laboratório	24
2.7 Estabilização de solos	26
2.7.1 Cal	27
2.7.2 Cimento	28
2.7.3 Cinzas Volantes.....	29

2.8 Comportamento térmico das construções em terra.....	30
2.9 Regulamentação das construções em terra	32
2.9.1 Regulamentação estrutural	32
2.9.2 Regulamentação do comportamento térmico para BTC	35
2.10 Considerações finais	36
2.11 Curiosidades.....	37
CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO DE FABRICO DOS BTC.....	39
3.1 Introdução	39
3.2 Descrição dos materiais utilizados.....	40
3.2.1 Solo residual granítico.....	41
3.2.3 Cinzas volantes.....	44
3.2.4 Ativador alcalino	45
3.3 Quantidades dos materiais utilizados.....	46
3.4 Geometria dos BTC	46
3.5 Processo de produção dos BTC	47
3.5.1 Preparação dos materiais	49
3.5.2 Pesagem dos materiais	50
3.5.3 Preparação da mistura numa misturadora de eixo vertical.....	51
3.5.4 Prensagem dos BTC	52
3.5.5 Cura dos BTC.....	54
3.6 Considerações finais	54
ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS BTC	57
4.1 Considerações iniciais.....	57
4.2 Ensaio térmico	58
4.2.1 Materiais e equipamentos.....	59
4.2.2 Seleção dos locais de medição	62
4.2.3 Condições e instalação dos equipamentos para realização dos ensaios	62

4.2.3 Procedimento de cálculo	64
4.3 Considerações adicionais sobre os ensaios	67
RESULTADOS	69
5.1 Análise de resultados	69
5.1.1 Parede junta seca	70
5.1.2 Parede junta preenchida por betume	80
5.1.3 Parede junta preenchida por betume e 2 cm de isolamento térmico (aglomerado de cortiça).....	91
5.2 Comparação de resultados	101
5.2.1 Comparação da resistência térmica dos BTC.....	102
5.2.2 Comparação com soluções de paredes convencionais	103
5.3 Considerações finais	110
CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	113
6.1 Conclusões	113
6.2 Perspetivas futuras	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1 :Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra.....	9
Figura 2. 2: Exemplos de antigas construções em terra	10
Figura 2. 3: Construções em terra no México	10
Figura 2. 4: Edificações em terra.....	11
Figura 2. 5: Edificações em terra.....	12
Figura 2. 6: Distribuição geográfica das construções portuguesas em terra.	12

Figura 2. 7: Técnica monolítica de terra projetada.....	15
Figura 2. 8: Construção em taipa.....	17
Figura 2. 9: Construção em taipa.....	18
Figura 2. 10: Habitação moderna em taipa, Beja.	18
Figura 2. 11: Produção de Adobe	20
Figura 2. 12: Habitação construída com alvenaria de adobe.....	20
Figura 2. 13: Diferentes tipos de BTC.....	21
Figura 2. 14: Parede de terra sobre engradado em madeira.....	23
Figura 2. 15: Construções em tabique	23
Figura 2. 16: Aplicação de cal no tratamento de solo de uma estrada.	28
Figura 2. 17: Construções em terra classificadas como património da humanidade pela UNESCO.....	37
Figura 2. 18: Construções em terra classificadas como património da humanidade pela UNESCO	38

Capítulo 3

Figura 3. 1: Comparação entre os resultados obtidos e o fuso recomendado por Houben e Guillaud (2008).....	43
Figura 3. 2 : Geometria dos BTC (Sturm et al., 2013)	47
Figura 3. 4 : Secagem do SRG	49
Figura 3. 5 : Ativador	50
Figura 3. 6 : Pesagem dos materiais	51
Figura 3. 7 – Mistura dos constituintes dos BTC	52
Figura 3. 8 : Pesagem da mistura para 1 BTC	53
Figura 3. 9 : Prensagem dos BTC.....	53
Figura 3. 10 : Cura dos BTC	54
Figura 3. 11 : Eflorescências nos BTC	55

Capítulo 4

Figura 4. 1 : Fluxímetros HFP01SC	59
Figura 4. 2 : Termopares em tipo T em cobre/constantan	60
Figura 4. 3 : Datalogger CR10X	60
Figura 4. 4 : Materiais de ligação e contato térmico	61
Figura 4. 5 : Sensor de temperatura do ar	61
Figura 4. 6 – Ar condicionado	62
Figura 4. 7 : Condições de ensaio	63
Figura 4. 8 : Instalação dos termopares	64

Capítulo 5

Figura 5. 1: instalação dos equipamentos.....	70
Figura 5. 2: Equipamentos instalados na parede de teste 1.	71
Figura 5. 3: Medições efetuadas para a zona centro do bloco.	72
Figura 5. 4: Medições efetuadas para a zona oca do bloco.	73
Figura 5. 5: Medições efetuadas para a junta vertical.	74
Figura 5. 6: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco.	76
Figura 5. 7: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco.	77
Figura 5. 8: Medições dos fluxímetros	80
Figura 5. 9: Equipamentos instalados na parede de teste 2	81
Figura 5. 10: Medições efetuadas para a zona centro do bloco	82
Figura 5. 11: Medições efetuadas para a zona oca do bloco	83
Figura 5. 12: Medições efetuadas para a junta vertical do bloco	85
Figura 5. 13: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco	86
Figura 5. 14: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco	88

Figura 5. 15: Medições dos fluxímetros	91
Figura 5. 16: Equipamentos instalados na parede de teste 3	92
Figura 5. 17: Medições efetuadas para a zona centro do bloco	93
Figura 5. 18: Medições efetuadas para a zona perfurada do bloco.....	94
Figura 5. 19: Medições efetuadas para a junta vertical do bloco	95
Figura 5. 20: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco	96
Figura 5. 21: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco.....	98
Figura 5. 22: Medições dos fluxímetros	101
Figura 5. 23: Resistências térmicas de paredes de alvenaria simples. (Fonte: ITE50).	102
Figura 5. 24: Comparação de resistências térmicas de materiais.	103
Figura 5. 25: Comparação das resistências térmicas das soluções construtivas.....	110

Índice de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2. 1: Vantagens das construções em terra.....	14
--	----

Capítulo 3

Tabela 3. 1 : Análise do solo residual granítico do Minho (Faria, 2012).....	41
Tabela 3. 2 : Quantidades de material utilizado para produção de BTC.	46
Tabela 3. 3 : Dimensões dos BTC	47
Tabela 3. 4 : Composição da mistura de BTC.....	48
Tabela 3. 5 : Quantidade para prensagem de 1 mistura.....	51

Capítulo 5

Tabela 5. 1: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento	78
Tabela 5. 2: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica	79

Tabela 5. 3: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento	89
Tabela 5. 4: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica	90
Tabela 5. 5: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento	99
Tabela 5. 6: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica	100
Tabela 5. 7: Características térmicas da parede 1	104
Tabela 5. 8: Características térmicas da parede 2.....	105
Tabela 5. 9: Características térmicas da parede 3.....	107
Tabela 5. 10: Características térmicas da parede 4.....	108
Tabela 5. 11: Características térmicas da parede 5.....	109

Capítulo 1

INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E ORGANIZAÇÃO

1.1 Introdução

Devido à sua abundância e facilidade de utilização, a terra é um dos materiais de construção mais antigos usados pelo Homem.

A construção em terra é uma solução que apresenta diversas vantagens quando comparada com soluções construtivas convencionais utilizadas nos países desenvolvidos, baseadas, por exemplo, na utilização de betão armado e alvenaria de tijolo cozido. Estas vantagens estão relacionadas não só com o baixo valor de energia incorporada no processo de produção, mas também com o bom desempenho térmico e acústico, elevada resistência ao fogo e custo relativamente baixo.

Neste tipo de construções, a questão da sustentabilidade na sua dimensão ambiental é de extrema importância, atendendo ao contexto atual das necessidades e preocupações das sociedades. As técnicas de construção em terra têm por base a utilização de materiais existentes no local de implantação dos edifícios ou construções, dando uso ao que a natureza oferece no meio circundante sem colocar em causa a sua integridade.

Os impactos ambientais para obtenção do betão são cada vez maiores, desde a extração do calcário até à obtenção dos agregados através de pedreiras. Este processo contribui para a destruição dos ecossistemas nos locais de extração. Mais ainda, o betão depois de usado não é reutilizável. A obtenção de uma tonelada de cimento Portland é responsável

pela emissão de cerca de 0,55 toneladas de dióxido de carbono por tonelada de betão. O processo de calcinação (1450 °C) emite 0,3 toneladas de dióxido de carbono por tonelada de material, resultante da queima de combustíveis durante o processo industrial de obtenção do cimento. A isto, tem-se ainda de acrescentar os custos de obtenção dos agregados, consoante a distância da origem onde são obtidos ao local de processamento. Para contrariar este último facto, tem aumentado a procura dos agregados cada vez mais perto dos locais das grandes construções, originando assim a proliferação de pedreiras e um ambiente degradável que afeta a biodiversidade (Torgal, 2011). Em resultado disto, na última década tem vindo a crescer o interesse em torno da criação de alternativas tecnologicamente muito desenvolvidas mas com base nas técnicas e nos materiais de construção tradicionais.

De acordo com vários estudos realizados, tais como o “Manual de Boas Práticas” (Caldas, 2010) refere que grande parte da nossa fatura energética vai para o consumo nos edifícios, contabilizando cerca de 40% da energia mundial. Isto demonstra claramente a importância da eficiência energética dos edifícios na redução do consumo de energia, sendo por isso imperativo a sua redução. Porém, para que tal aconteça o sistema de construção tem de ter um papel mais eficiente na poupança energética. Em Portugal a regulamentação existente para redução dos consumos energéticos nos edifícios até há bem pouco tempo era o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.º 80 de 4 de abril 2006 (DL80/2006, 2006). Este foi recentemente atualizado para o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), Decreto-Lei n.º 118 de 20 de agosto de 2013 (DL118/2013, 2013), que vem claramente impor a limitação do consumo energético dos edifícios novos, abrindo espaço para alternativas como a construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC).

As técnicas da construção em terra são inúmeras e variam de região para região conforme as características de cada lugar. As mais comuns são: o adobe, o superadobe, a taipa, o tabique, e os blocos de solo melhorado. Mais recentemente, surgiu a construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC).

Com o surgimento desta nova técnica construtiva foram desenvolvidos BTC, nos laboratórios de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em que foi utilizado solo residual granítico da região do Minho (norte de Portugal) estabilizado com ativação

alcalina de cinzas volantes. Visto ser uma nova técnica com novos constituintes, torna-se imprescindível o conhecimento de todas as suas propriedades.

1.2 Motivação e objetivos do trabalho

A realização deste trabalho de investigação prático tem como finalidade o estudo/análise do comportamento termoenergético de blocos de terra comprimida (BTC) ativados alcalinamente através de cinzas volantes.

Para a avaliação do comportamento termoenergético dos BTC foram realizados ensaios numa parede simples construída no laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A realização destes ensaios foi efetuada com base nas normas C1046 e C1155, de 2001, publicadas pela ASTM (American Society for Testing and Materials), sendo que a primeira diz respeito, principalmente, à forma como devem ser utilizados e instalados os equipamentos, e a segunda ao método de cálculo e as regras para validação dos resultados.

Depois de efetuada a caracterização do comportamento energético dos BTC, e em conjugação com outros trabalhos desenvolvidos nos laboratórios de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pretende-se realizar a validação dos BTC fabricados com solo residual granítico da região Minho e ativados alcalinamente como uma nova técnica construtiva. A aplicação desta técnica (relativamente recente) é inovadora e pretendendo-se avaliar o seu potencial.

Assim, o principal objetivo do desenvolvimento deste trabalho, a caracterização do comportamento termoenergético dos BTC fabricados com solo residual granítico da região do Minho com ativação alcalina, passa pelas seguintes etapas:

- Caracterizar/ calcular a resistência térmica dos BTC;
- Compreender a variação do comportamento termoenergético dos BTC em conjunto com outros elementos construtivos.

1.3 Metodologia

A realização do presente trabalho de investigação, teve uma primeira fase de pesquisa bibliográfica, que continuou ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho experimental. A adoção deste método de trabalho permitiu a aquisição e a consolidação de conhecimentos acerca do que tem vindo a ser desenvolvido na área das construções em terra, tanto a nível nacional, como a nível internacional.

Os objetivos identificados no subcapítulo anterior foram conseguidos através da utilização de métodos e de recursos laboratoriais. A realização deste trabalho visa gerar conhecimento através de uma aplicação prática e experimental da caracterização do comportamento termoenergético de uma parede constituída por BTC de solo residual granítico com ativação alcalina de cinzas volantes, sendo o trabalho realizado sobretudo de caráter experimental.

Este trabalho desenvolveu-se em várias fases. Numa primeira fase, foram produzidos os BTC, para que, numa fase seguinte, fosse possível passar para a construção de uma parede simples de dimensões 2,70×4,10 metros. Depois de executada a parede, instalaram-se todos os equipamentos necessários para a medição de fluxos de calor e temperaturas superficiais de elementos. Esta medição foi efetuada, primeiro, na parede com junta seca, em seguida na parede com as juntas barradas por betume, e, por fim, na parede com as juntas barradas por betume e com 2cm de isolamento térmico – neste caso o aglomerado de cortiça.

Numa fase seguinte, procedeu-se ao cálculo e à validação dos resultados para determinação da resistência térmica dos BTC em estudo.

Na fase final, foi efetuada a comparação do desempenho termoenergético dos BTC com outros materiais e soluções construtivas correntes na construção em Portugal.

1.4 Organização do documento

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, descrevendo-se em seguida, de forma sucinta, o conteúdo de cada um.

No primeiro capítulo, para além do enquadramento, são apresentados os objetivos e a motivação para este trabalho, assim como, a metodologia e trabalho experimental que foi adotada ao longo do seu desenvolvimento.

No segundo capítulo, é efetuada uma revisão bibliográfica sobre a construção em terra. Neste, é apresentada a história da construção em terra, assim como, a sua distribuição no mundo e em particular em Portugal. Foram também descritas as técnicas construtivas mais utilizadas referindo as suas vantagens e desvantagens. No entanto, e uma vez que é objeto de estudo deste trabalho, a alvenaria em BTC é apresentada de forma mais detalhada. Neste capítulo é ainda objeto de estudo a caracterização dos solos e a sua estabilização. Por fim é apresentada a regulamentação existente para este tipo de construção, assim como algumas curiosidades acerca deste tema.

No terceiro capítulo, é efetuada a caracterização e processo de fabrico dos BTC. Inicialmente é realizada uma descrição desta técnica construtiva desenvolvida nos laboratórios de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sendo em seguida, descritos os materiais utilizados e as suas características, nomeadamente as características do solo residual granítico, assim como o método de estabilização através da ativação alcalina de cinzas volantes, utilizado nesta técnica construtiva. Em seguida é apresentada a geometria dos BTC e os seus processos de produção. Por fim é descrito todo o processo de fabrico dos BTC.

No quarto capítulo, é aprofundado o principal objeto de estudo deste trabalho prático, o ensaio de caracterização térmica dos BTC. Inicialmente é feita uma breve introdução em que é salientada a importância do incentivo às construções em terra, assim como a importância da caracterização térmica dos BTC. Em seguida é descrito o ensaio térmico assim como as normas utilizadas para realização deste ensaio. Descrevem-se os materiais e equipamentos, a seleção dos locais de medição, as condições e instalação dos equipamentos, bem como os procedimentos de cálculo e validação dos resultados da resistência térmica.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados do ensaio efetuado. Esta apresentação de resultados divide-se em três fases. Uma primeira fase referente ao ensaio na parede com junta seca A segunda fase referente ao ensaio na parede com junta com betume e por último, a terceira fase referente ao ensaio na parede com junta

barrada com betume e com 2cm de isolamento, ou seja aglomerado de cortiça. Em seguida é realizada a análise destes resultados. Para tal, é realizada uma comparação das resistências térmicas obtidas para o BTC com as resistências térmicas de materiais de construção correntemente utilizados. Na análise de resultados é também comparada a solução construtiva em BTC com várias soluções construtivas convencionais, permitindo desta forma avaliar a capacidade e a potencialidade desta técnica construtiva.

No sexto capítulo, é realizada a análise de resultados e as considerações finais, assim como desenvolvimentos futuros na perspectiva de ser dada continuidade a este trabalho.

Por último, no sétimo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE – CONSTRUÇÕES EM TERRA

2.1 Introdução

Atualmente existe uma grande necessidade de reduzir a energia consumida pela indústria da construção, assim como, encontrar formas de diminuir a poluição que esta acarreta. Esta necessidade deve-se ao facto da construção e manutenção dos edifícios ser uma das atividades humanas com maior impacto no meio ambiente.

A terra, como material de construção, é uma solução que apresenta diversas vantagens quando comparada com soluções construtivas convencionais usadas nos países desenvolvidos, baseadas na utilização de betão armado e alvenaria de tijolo cozido, nomeadamente em termos do baixo valor de energia incorporada, assim como proporciona edifícios com baixo impacto ambiental, mais sustentáveis e com custo relativamente baixo.

Tendo em atenção o contexto atravessado pela sociedade atual, devido à importância da questão ambiental, as construções em terra têm cada vez mais um relevante impacto na comunidade. As técnicas de construção em terra têm por base a utilização de materiais existentes no local de implantação, dando uso ao que a natureza oferece no meio circundante. No entanto, todo o potencial da terra como material de construção de edifícios e a sua projeção no futuro depende do desenvolvimento tecnológico e técnico.

A terra é uma material abundante, com inúmeras características ecológicas, começando pelo simples fato de estar no local da obra e ser completamente reciclável. Tanto, que se pode destruir uma casa de terra e construir outra com a mesma terra. É um material que, não sendo o melhor em termos de desempenhos pontuais de qualquer umas das situações a que está sujeita, acaba por ser o melhor no cumprimento cumulativo de todas as solicitações. Segundo estudos efetuados por Murta et al., (2010) é demonstrado que a solução com paredes em BTC tem uma redução de gastos energéticos e de emissões de superior a 75%, assim como, uma redução de custos de 40% quando comparada com as soluções a habitações unifamiliares com soluções diferentes, nomeadamente: i) solução com estrutura porticada de betão armado e lajes aligeiradas pré fabricadas, ii) solução com paredes resistentes em blocos de terra comprimida e iii) solução com reutilização de madeira proveniente de demolições habitacionais.

Assim sendo, e com base em estudos efetuados verifica-se que a terra é um material com enorme potencial no setor da construção, tendo em atenção o contexto atravessado pela sociedade atual. No entanto, a terra como material de construção ainda carece de muito estudo, percebendo-se assim a elevada importância do estudo e desenvolvimento deste tema.

2.2 Enquadramento histórico das construções em terra

Não é consensual a data em que o homem começou a utilizar a terra na construção. Contudo, e não sendo muito relevante para o trabalho em questão saber se a construção em terra se iniciou há mais de 9000 ou há mais de 10000 anos, estima-se que tenha começado a ser utilizada há cerca de 10000 anos, tendo surgido de uma forma natural através da necessidade básica que o ser humano apresenta em se proteger.

A terra possibilita uma infinidade de aplicações, sendo utilizada nas mais variadas edificações. Imagina-se que quase todas as culturas antigas tenham utilizado o solo para a construção de casas, palácios, municípios, fortalezas e obras religiosas, levando esta utilização generalizada da construção em terra, em seis dos sete continentes do mundo, a ser um dos patrimónios mais diversificados e universais da Humanidade (Correia, 2006).

Estima-se que cerca de 1/3 da população mundial vive em edifícios construídos em terra (Houben e Guillaud, (2008). No entanto, outros autores (Rael, 1971; Dethier, 1986; Eires & Jalali, 2008) referem que quase 50% da população mundial vive em habitações feitas com terra, qualquer coisa como 3.000 milhões de indivíduos (Figura 2.1).

Em estimativas mais recentes e de acordo com as estatísticas da UNCHS (United Nations Center for Human Settlements), 40% da população mundial vive em habitações de terra (Auroville Earth Institute, 2014). Verificando-se assim que os números que são apresentados por estes autores não coincidem, no entanto, verifica-se que o número de pessoas que utiliza habitações edificadas recorrendo a técnicas de construção em terra é ainda bastante significativo.

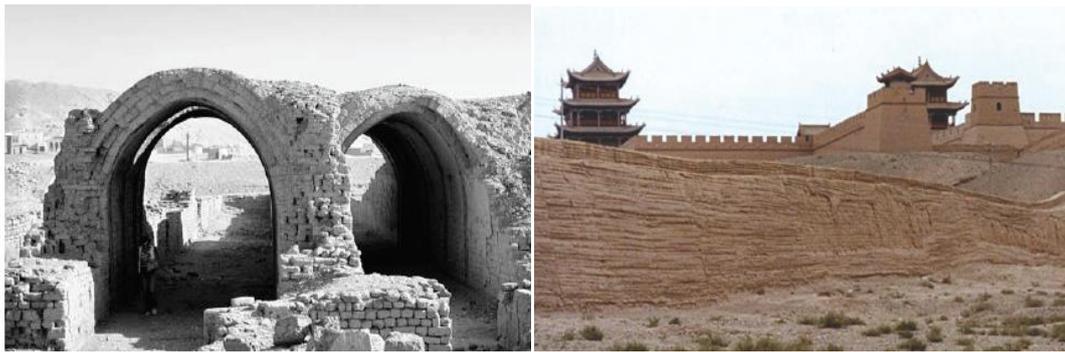


Figura 2. 1: Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra

É evidente a dimensão que esta tecnologia assume no panorama construtivo mundial, sendo de grande importância como técnica construtiva nos países subdesenvolvidos e em vias de desenvolvimento, e que podem vir a ter esta importância também nos países desenvolvidos e industrializados.

Por todo o mundo é possível encontrar construções em terra datadas de há vários séculos, que ainda hoje se mantêm em bom estado de preservação. O templo de Ramsés II em Gourná, construído em adobe há 3200 anos é um deles (Figura 2.2 a)).

Também na Grande Muralha da China existem troços bastante extensos construídos em taipa, datados de há aproximadamente 3.000 anos. Importa referir que muitos dos troços construídos em taipa só mais tarde foram revestidos a alvenaria de pedra (Figura 2.2 b)).



a)

b)

Figura 2. 2: Exemplos de antigas construções em terra: a) Templo de Ramsés, Gournah, Egípto (Minke 2006); b) Utilização de taipa na Grande Muralha da China (Jaquin, 2008).

Na América central também se encontram construções em terra de grande interesse, como é o caso da pirâmide de Uxmal no México, construída entre os séculos VI e X. Esta é uma mega estrutura, com o centro em terra compactada e o exterior recoberto por pedras (Figura 2.3 a)). Um outro exemplo, também no México, é a Pirâmide do Sol em Teotihuacán, com o seu núcleo central constituído por cerca de dois milhões de toneladas de terra compactada (Figura 2.3 b)).



a)

b)

Figura 2. 3: Construções em terra no México: a) Pirâmide de Uxmal, México; b) Pirâmide do Sol de Teotihuacan, México.

Entre as construções mais antigas com uso de terra, está também o Povoado de Taos, no estado do Novo México, que foi erguido entre 1000 e 1500 D.C, com paredes de argila seca ao sol e reforçada com fibras vegetais (Figura 2.4 a)).

Existe também uma cidade histórica ainda hoje habitada, a cidade de Shibam do Iémen, que teve origem no século III, embora os edifícios que persistiram até aos nossos dias sejam na sua maioria do século XVI. A cidade é composta por edifícios que possuem entre 5 a 11 andares (Helfritz, 1937), havendo inclusive um minarete que tem 38 m de altura. Estes, são construídos com paredes exteriores em adobe cuja espessura se estreita gradualmente nos andares superiores para aligeirar o seu peso e melhorar a estabilidade (Figura 2.4 b)).

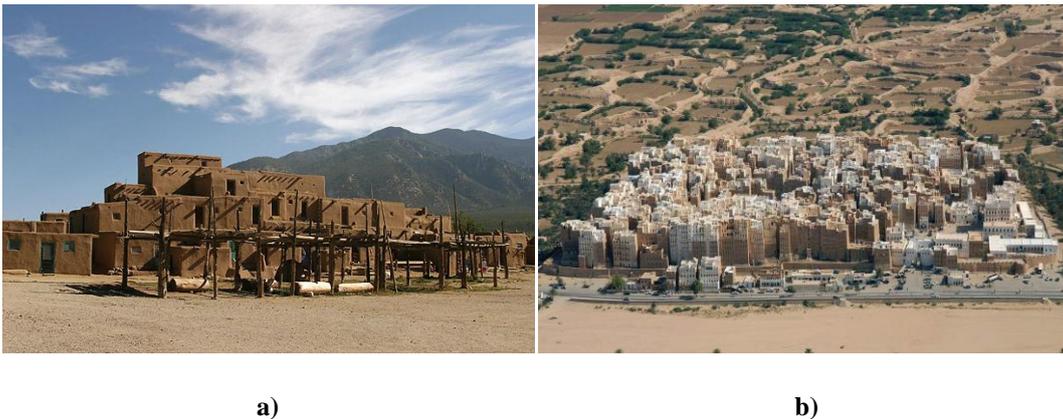


Figura 2. 4: Edificações em terra: a) Edifícios em terra, Taos, Novo México; b) Edifícios em adobe, Shibam, Iémen.

Também em Portugal é possível encontrar construção em terra datada de há vários séculos. Os povos Muçulmanos foram os maiores impulsionadores deste tipo de construção em Portugal (RIBEIRO, 1969). Um exemplo desta influência é o castelo de Paderne no Algarve onde foi utilizada a construção em taipa (Figura 2.5 a)).

No entanto, a dinâmica formativa à volta construção em terra e mesmo o entusiasmo com que novas gerações de audazes e desempoeirados Arquitetos encaram este tema, ainda não encontra correspondência ao nível do sector da construção civil. Ainda assim é importante não deixar de referir, que apesar de constituírem uma percentagem sem grande expressão em termos do mercado imobiliário, vão já tendo lugar várias obras de construção em terra no Alentejo e Algarve (Figura 2.5 b)), sendo que a sua incidência se faz sentir mais nas proximidades da Costa Vincentina.



a)

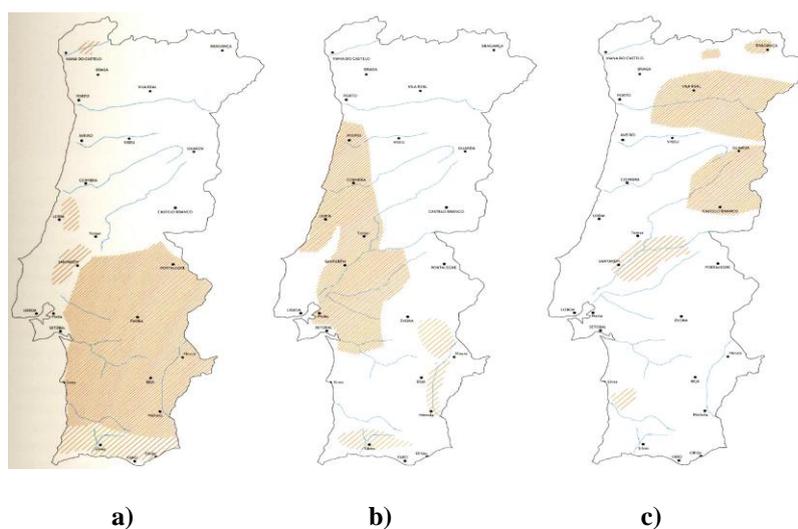
b)

Figura 2. 5: Edificações em terra: a) Castelo de Paderne, Algarve; b) Habitação unifamiliar em Odemira (Parreira, 2007).

2.3 Construções em terra em Portugal

A construção de terra em Portugal data de há várias centenas de anos. No início do século XX assistiu-se ao declínio deste tipo de construção para a construção em tijolo de barro cozido, contudo no fim do mesmo século, é patente o início de um movimento edificatório no Sul de Portugal caracterizado pelo retomar de ancestrais técnicas de construção.

Em praticamente todas as regiões de Portugal continental é possível encontrar construções em terra que utilizaram as mais diferentes técnicas construtivas (Figura 2.6).



a)

b)

c)

Figura 2. 6: Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (imagem extraída de Jorge et al., 2005).

A terra como material de construção tem uma pluralidade muito grande ao nível de técnicas e elementos construtivos. Esta pode ser escavada, empilhada, modelada, prensada, apiloada (compactada), recortada, extrudida e moldada. Pode servir também para fazer o recobrimento, o enchimento ou a cobertura de estruturas. Existem diversos modos de construir e podem ser utilizadas diversas técnicas construtivas consoante o tipo de terra disponível. Dentro das principais técnicas tradicionais de construção baseadas no uso da terra em Portugal, encontram-se o tabique, o adobe e a taipa, sendo que a última foi a mais disseminada. A taipa era a técnica mais utilizada, até meados dos anos cinquenta do século XX, no Baixo Alentejo e sul do Alto Alentejo. O adobe foi utilizado mais no centro litoral, em Aveiro, mais especificamente.

As construções em terra trazem benefícios ambientais, sociais, culturais e económicos. Para a construção de habitações populares estas soluções construtivas podem ter um significado ainda maior, com a recuperação da tradição histórica desta tipologia de construção em Portugal, valorizando a sua cultura.

Sendo um material em abundância e disponível na grande maioria das regiões, o uso da terra crua para construções sociais surge como uma resposta possível para as edificações eco eficientes e sustentáveis.

2.4 Vantagens das construções em terra

As vantagens para esta tipologia de construção, além da disponibilidade abundante, passam pela economia de custos financeiros, pela racionalização de recursos energéticos, pela metodologia de construção simples e concebível, pode ser facilmente reciclada, diminui a dependência de recursos não sustentáveis, permite a redução dos níveis de energia incorporada, a redução de emissões de CO₂ dos processos industriais, a redução do uso de substâncias químicas nocivas, conduz a elevada massa térmica (adequada para uso de arquitetura solar passiva), equilibra e melhora a humidade do ar interior, redução do uso de transportes (utilização de matéria prima local), maior potencial de reciclagem e redução de resíduos, boa resistência ao fogo, versátil e flexível (variações de tipologias de edificações), pode ser utilizada para criação de empregos locais. Assim sendo, de acordo com os diferentes níveis de análise, as construções em terra têm as seguintes vantagens:

Tabela 2. 1: Vantagens das construções em terra

A nível económico	Redução considerável dos custos da construção, já que se trata de um recurso disponível no próprio local ou conseguido a baixos custos.
A nível energético	Utilizada localmente com baixos ou reduzidos custos de transporte, não necessitando de ser submetida a qualquer transformação industrial.
A nível ecológico	A terra é utilizada em cru, não provoca poluição decorrente do seu tratamento. É também um material totalmente reutilizável, o número de vezes que for necessário.
A nível político	Material global existente em todo o mundo.
A nível social	A terra crua permite reduzir os custos da habitação social e permite desenvolver a sociabilização e a autonomia do povo, por ser uma técnica que permite a autoconstrução.
A nível cultural	A terra permite a adequação da arquitetura às possibilidades de cada cultura e de cada região.

São muitas as vantagens, que combinadas com adequados projetos de arquitetura e com a utilização de metodologias próprias podem resultar em economia energética. *“Portugal apresenta uma situação privilegiada para o uso da terra para a construção, tanto em termos climáticos e geográficos, como culturais. Podemos assumir um papel de vanguarda no campo da sustentabilidade da construção e que poderia ser um motor de desenvolvimento económico do setor da construção”* (Lourenço em Fernandes e Correia, 2005).

2.5 Sistemas de construção em terra

Considerações prévias

Existem várias técnicas de construção em terra no mundo inteiro, as quais se podem subdividir em três sistemas fundamentais:

- Monolítica (*in situ*);
- Por unidades (alvenaria);
- Por enchimento e revestimento.

Nos subcapítulos seguintes são apresentadas, de forma resumida, as principais características de cada um destes 3 sistemas.

2.5.1 Monolítica

A construção monolítica pode ser executada de diversas formas. A taipa, a técnica mais conhecida no nosso país, consiste na compactação de terra húmida num taipal (cofragem de madeira). A terra vazada ou moldada recorre ao uso de cofragens à semelhança da taipa, mas é utilizada terra num estado mais plástico e sem compactação.

Outro processo é a terra armada com aço à semelhança do betão. Recorre-se a uma cofragem perdida em madeira pelo interior e terra projetada pelo exterior, sendo devidamente regularizada a superfície. Este processo é mais atual (Figura 2.7).



Figura 2. 7: Técnica monolítica de terra projetada: a) Projeção da terra; b) Regularização da superfície.

Ainda como técnica monolítica temos também a terra empilhada ou “Cob” que consiste em colocar a terra por empilhamento, normalmente com adição de palha, e uma posterior regularização da superfície. Esta técnica potencia a criação de paredes com um carácter mais escultural.

Recentemente, em Portugal, iniciou-se o recurso a uma técnica monolítica, com a designação de “Barrocal”. Esta técnica faz uso de terra, cal e palha, que são misturadas numa betoneira tradicional de eixo inclinado. Posteriormente, essa mistura é colocada no interior de uma cofragem e compactada com vibradores de agulha correntemente utilizados na execução de betão.

2.5.1.1 Taipa

Como referido anteriormente, a taipa é a técnica de construção em terra mais conhecida em Portugal. É uma técnica de construção monolítica que consiste na compactação de um solo de consistência de terra húmida.

Esta técnica construtiva encontra-se disseminada a nível mundial e muitas dessas construções já fazem parte do património mundial da UNESCO. Na cidade de Lyon, em França, existem alguns edifícios com mais de 300 anos ainda habitados. Em Weilburg, na Alemanha, ainda permanece habitado um edifício de 6 andares, que é considerado o edifício construído em taipa mais alto da Europa. Em relação a Portugal, até aos anos 50, a taipa era a técnica construtiva mais utilizada no centro e sul do país (Ribatejo, Alentejo e Algarve). A taipa é uma técnica apropriada para climas quentes e secos, com pouca precipitação, já que a solução construtiva tem uma resistência à água limitada.

Nas últimas décadas, a taipa e o adobe, têm sido substituídos pelo tijolo de barro furado de produção industrial, contudo, verifica-se um pior comportamento térmico dos edifícios correntes em relação às espessas paredes de taipa tradicional (Correia, 2000).

A técnica de construção em taipa consiste em compactar terra húmida dentro de um taipal (cofragem de madeira), de forma a construir paredes monolíticas. A compactação pode ser realizada através da compactação tradicional ou através da compactação mecanizada.

Atualmente, ainda se constrói mediante o processo de compactação tradicional em pequenas obras. A terra é compactada em camadas de aproximadamente 10 cm, até preencher todo o taipal, este é posteriormente removido e reerguido para a camada seguinte. A forma de encaixe entre camadas na horizontal é reta ou inclinada para melhorar o travamento entre as camadas.



a)

b)

Figura 2. 8: Construção em taipa: a) Taipal; b) pilões tradicionais

Mais recentemente, com o uso das novas tecnologias, desenvolveu-se a compactação mecanizada. Esta é realizada segundo os mesmos moldes que a compactação tradicional, diferindo apenas na qualidade e dimensões da cofragem e no meio de compactação.

A cofragem pode ser móvel ou amovível conforme as dimensões utilizadas, recorrendo a placas e perfis à base de contraplacado de madeira ou de metal.

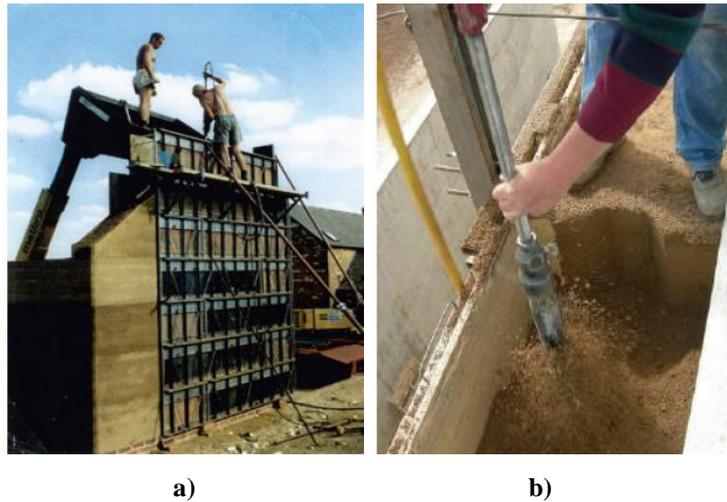


Figura 2. 9: Construção em taipa: a) Cofragens metálicas; b) pilões mecanizados

Atualmente, é frequente o recurso à compactação mecanizada, visto tornar todo o processo de compactação mais fácil e rápido.

A construção em taipa, muito utilizada no passado, é ainda hoje uma técnica muito atual (Figura 2.10).



Figura 2. 10: Habitação moderna em taipa, Beja.

2.5.2 Por unidades

Para execução de paredes em alvenaria de terra são utilizados diferentes tipos de unidades pré-fabricadas. Como por exemplo:

- Adobe;
- Bloco de terra comprimida (BTC);
- Blocos de terra recortada ou terra extrudida.

O adobe é um bloco produzido mediante a moldagem de terra plástica. O seu processo de moldagem pode ser manual ou mecanizado.

O BTC é produzido através da prensagem da terra no seu estado húmido, podendo ter um processo de fabrico mecânico ou hidráulico.

Os blocos extrudidos são obtidos através do fabrico de unidades de um processo de extrusão utilizando terra plástica. Já os blocos de terra recortada são obtidos pelo recorte da terra no seu estado natural e sólido, desde que o tipo de terra tenha resistência mecânica. Em relação à terra extrudida, esta consiste num método de fabrico por extrusão que permite a obtenção não só de blocos para alvenaria, mas também placas pré-fabricadas que podem ser aplicadas como revestimento de paredes.

2.5.2.1 Adobe

A técnica de construção em adobe é caracterizada pela sua simplicidade de fabrico e de edificação. Talvez por este motivo, a maioria das construções em terra antigas foram realizadas com recurso à técnica de adobe, sendo que, muitas delas atualmente ainda são habitadas.

Os adobes são blocos de terra produzidos a partir de terra e água, moldados à mão ou em moldes de madeira ou metal, sendo desmoldados ainda no estado fresco e colocados a secar à temperatura ambiente.

A técnica de construção em adobe requer o uso de um solo plástico e argiloso, por isso é sobretudo utilizada em locais onde é possível encontrar água. A utilização de solo argiloso leva ao aparecimento de fissuras quando o adobe seca devido à retração do material. Por isso, é costume reforçar o adobe misturando palha ou outras fibras vegetais para evitar este comportamento.



Figura 2. 11: Produção de Adobe

Construir em alvenaria de adobe é simples, sendo semelhante à colocação do tijolo convencional. O assentamento dos adobes é realizado com argamassa à base de terra de forma a se obter um melhor comportamento de conexão entre os materiais, uma vez que se mantém o mesmo nível de retração, evitando-se assim o aparecimento de fissuras ou destacamento do material.

A alvenaria em adobe é frequente no Sul de Portugal em edifícios de habitação, ainda em razoáveis condições de conservação, que datam do início do século XX.



Figura 2. 12: Habitação construída com alvenaria de adobe.

2.5.2.2 BTC

A técnica de construção em alvenaria de BTC surgiu da evolução do adobe, através da estabilização do solo por meios mecânicos, através da compactação do mesmo em

moldes. Desta forma é possível obter blocos de terra prensada, mais resistentes e duráveis em relação ao adobe. Além disso, na construção em terra com BTC é possível um maior controlo da qualidade de produção, já que o processo é mais industrializável (Silva, 2013).

A execução de unidades habitacionais, com alvenarias de BTC é a técnica de construção em terra mais utilizada, atualmente, em Portugal, com a vantagem adicional de apresentarem desempenhos mecânicos superiores às alvenarias de adobe.

A prensagem do solo é realizada através de uma prensa manual ou mecanizada, o que permite realizar diversos tipos de blocos, maciços ou perfurados, e placas de revestimento. A terra utilizada é de consistência húmida, semelhante à da taipa, permitindo obter blocos bastantes resistentes, no entanto, mais pesados que o adobe.

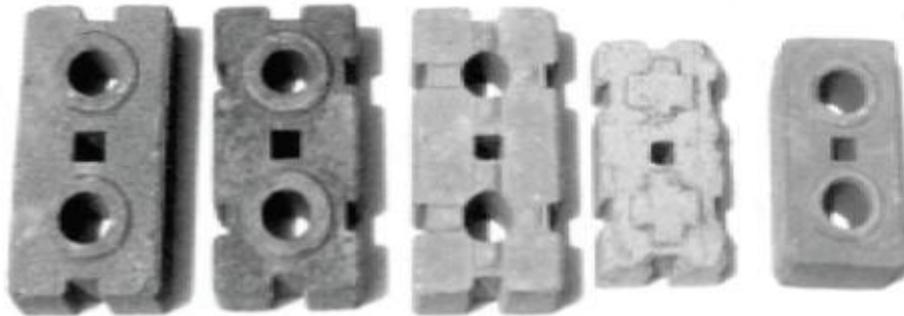


Figura 2. 13: Diferentes tipos de BTC

A construção com alvenaria de BTC permite uma execução mais rápida, facilidade de montagem, assim como, uma diminuição dos resíduos de construção. Com as vantagens da construção em terra já enumeradas anteriormente, que também são comuns aos BTC, referem-se agora outras características que tornam a alvenaria de BTC uma forma de construir em terra com um elevado potencial:

- Baixo custo de produção, uma vez que a matéria-prima existe no local e a mão-de-obra é semiquificada;
- De fácil adaptação às diversas necessidades técnicas, sociais e hábitos culturais;
- Tecnologia de fácil aprendizagem, exigindo poucas capacidades técnicas;
- O equipamento necessário à produção está disponível na forma de prensas manuais ou hidráulicas;

- É possível um controlo na produção, aumentando a qualidade e regularidade, permitindo assim diversos acabamentos.

No entanto, os BTC também possuem algumas limitações:

- Necessidade de uma adequada caracterização do solo;
- Impossibilidade de abertura de grandes vãos e de construção de edifícios em altura;
- Desempenho mecânico baixo quando comparado com o betão e com outros materiais mais populares;
- Necessidade de algum conhecimento das equipas de trabalho para a produção de BTC de qualidade;
- Falta de regulamentação adequada.

Devido às propriedades do solo não serem adequadas, muitas vezes é necessário estabilizar o solo para melhorar as propriedades dos BTC, tanto de resistência como de durabilidade. As técnicas mais comuns de estabilização consistem na adição de cimento ou cal ao solo. Recentemente, têm surgido novas técnicas mais eficientes e ecológicas, como se apresentará nos capítulos seguintes.

2.5.3 Por enchimento e revestimento

Entre estas técnicas encontra-se o tabique. Esta técnica consiste em colocar terra, no seu estado plástico e ou cal, sobre um suporte engradado de madeira, cana ou vime.

Existe ainda outra variante que passa pelo enchimento de terra entre uma parede dupla de alvenaria de pedra ou tijolo.

2.5.3.1 Tabique

A técnica de construção em tabique consiste em ter uma estrutura de suporte, normalmente em madeira, que é preenchida com terra. À terra de enchimento muitas das vezes é adicionada palha ou casulos de espigas de milho.

Neste método construtivo, a terra serve apenas como material de enchimento e revestimento, sendo a madeira a conferir a capacidade resistente à estrutura, tornando assim este método bastante distinto dos restantes (Figura 2.14).



Figura 2. 14: Parede de terra sobre engradado em madeira

A construção em tabique é uma das técnicas de construção em terra mais antigas, mas que ainda é muito utilizada por todo o mundo atualmente (Houben & Guillaud, 2008) (Figura 2.15).



a)

b)

Figura 2. 15: Construções em tabique: a) habitação antiga; b) habitação moderna.

2.6 Caraterização dos solos

O material utilizado como matéria-prima na construção em terra consiste na fase mineral dos solos. Esta fase é constituída por partículas minerais de tamanho variável nomeadamente argilas, siltes e material arenoso.

Sendo assim, o comportamento de um determinado solo é função da quantidade de argilas, siltes e areias, existentes nesse solo, assim como, da quantidade de água presente no mesmo.

Portanto, torna-se fundamental o conhecimento das propriedades do solo, nomeadamente: a sua granulometria, o seu comportamento mecânico e o seu comportamento à deformação para um determinado nível de humidade. Para tal, é necessário proceder à sua caracterização com recurso a ensaios específicos para o efeito. Ensaios esses que podem ser divididos em ensaios expeditos, realizados em campo e com uma fiabilidade baixa, e ensaios laboratoriais, realizados segundo procedimentos normalizados.

2.6.1 Ensaios de campo

Neste tipo de ensaios é possível determinar algumas conclusões iniciais sobre que tipo de solo existente no local de trabalho, dispensando assim a realização de ensaios de laboratório, os quais são sempre dispendiosos. Em seguida destacam-se ensaios utilizados pelo grupo francês CRAterre e citados por (Eusébio, 2001):

- Observação da cor;
- Teste do cheiro;
- Teste do tato;
- Teste do brilho;
- Teste de aderência;
- Teste de sedimentação;
- Teste visual por peneiração expedita;
- Teste de retenção de água;
- Teste de resistência à secagem.

2.6.2 Ensaios de laboratório

Este tipo de ensaios são mais rigorosos e mais confiáveis que os ensaios de campo. Contudo, apresentam uma maior necessidade de equipamentos para a sua realização.

Apresentam-se alguns dos ensaios de laboratório existentes para a caracterização dos solos:

- Teor de água;
- Matéria orgânica;
- Análise granulométrica;
- Limite de consistência;
 - Limite de liquidez
 - Limite de plasticidade
- Compactação com ensaio Proctor;
- Ensaio de resistência à compressão simples.

Uma vez que, para realização dos BTC objeto de estudo com este trabalho, foi utilizado um solo residual granítico da região Minho, descrevem-se, em seguida, os ensaios que foram realizados para a caracterização geotécnica deste solo:

Análise granulométrica: consiste na identificação das percentagens mássicas da fração arenosa do solo acima de 0,075 mm (peneiro nº200 ASTM), obtidas por peneiração através de uma série de peneiros normalizados. A peneiração é efetuada por via húmida para se obter a desagregação das partículas mais finas (LNEC E239-1970). O solo retido em cada peneiro é posteriormente seco em estufa, para apurar a percentagem em relação à massa do provete. Para a identificação dos diferentes constituintes do solo abaixo de 0,075 mm (siltes e argilas), utiliza-se o ensaio de sedimentação (LNEC E 196-1966), em que o solo é colocado em suspensão num líquido, para determinar a velocidade de sedimentação a qual é por sua vez função do diâmetro das partículas, através da lei de Stokes. O ensaio passa pelo enchimento de um frasco até $\frac{1}{4}$ da sua altura com solo e os restantes $\frac{3}{4}$ com água, ao fim de várias horas mede-se a espessura das várias camadas, sabendo-se que a primeira camada a depositada foi a de saibros, a que se seguem as camadas de siltes e argilas.

Limites de Atterberg ou limites de consistência: Permitem avaliar a natureza de um solo, definindo os teores em água que limitam os possíveis estados, sólido, líquido ou plástico, definindo respetivamente o limite de retração, o limite de liquidez e o limite de plasticidade (NP 143-1969). O limite de liquidez corresponde ao teor em água obtido no aparelho de Casagrande, o qual consiste num prato côncavo preenchido com uma pasta

de solo, no qual é traçado um rasgo que se volta a unir numa distância de 1 cm após 25 ressaltos. O limite de plasticidade corresponde teor de água de um rolo de terra o qual se separa para um diâmetro de 3mm. Se o rolo se partir com menos de 3mm, tem água a mais e a experiência deve repetir-se com menos água. Se o rolo se partir com um diâmetro superior a 3mm, a experiência deve repetir-se com um teor de água superior.

Ensaio Proctor: utilizado para determinar o teor de água ótimo o qual corresponde à máxima compactação do solo (E LNEC 197-1971). Este ensaio utiliza uma fração de solo inferior a 4,76mm (peneiro nº 4) ao qual se adicionam teores de água crescentes com diferenças de 2%, a qual é compactada em 3 camadas com 25 pancadas por camada, de um aparelho manual (2,49kg e queda de 30,5 cm) ou mecânico. Regista-se a massa e o volume e num gráfico marca-se a massa volúmica seca versus teor de água, onde posteriormente se retira o teor de água ótimo que corresponde à baridade máxima.

Uma vez realizada a caracterização geotécnica do solo, muitas vezes verifica-se que as propriedades do mesmo não são adequadas, sendo necessário proceder à sua estabilização de forma a melhorar as suas características, tanto de resistência como de durabilidade.

2.7 Estabilização de solos

Estabilizar um solo consiste numa alteração das suas características de forma a melhorar o seu comportamento mecânico ou físico. Os métodos para estabilização/melhoramento do solo subdividem-se em estabilização mecânica e estabilização química.

Na estabilização mecânica procuram-se melhorar as características dos solos através duma melhor arrumação das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correções da sua granulometria. Já a estabilização química procede à modificação das características dos solos através de aditivos, tais como a cal, o cimento ou outro tipo de aditivos.

A estabilização de solos para construção em terra pode incluir fibras naturais (Ghavami et al., 1999) ou artificiais (Binici et al., 2005), ou, até mesmo, excrementos de animais (Ngowi, 1997). Tradicionalmente, os produtos mais utilizados são o cimento e a cal. O conceito de melhoramento ou estabilização dos solos através de reações químicas entre as partículas de solo, a água dos vazios e os materiais adicionados é semelhante tanto

para o cimento como para a cal. Porém os efeitos da estabilização com cal são mais rápidos do que os da estabilização com cimento (Cristelo, 2001).

No entanto, nos últimos anos, devido às crescentes preocupações ambientais e económicas têm sido desenvolvidas novas técnicas, nomeadamente a ativação alcalina de cinzas volantes (Soares, 2013).

2.7.1 Cal

Se a um solo húmido se misturar cal ocorrerão várias reações químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificam as suas características. As reações mais importantes que ocorrem durante o processo de estabilização são agrupadas da seguinte forma: permuta iónica e floculação; ação de cimentação (ou reação pozolânica) e ação de carbonatação.

A permuta iónica faz com que os catiões Ca^{2+} se adsorvam à superfície das partículas diminuindo a sua electronegatividade e promovendo a floculação. A ação dos iões cálcio, inicia-se logo após a adição de cal ao solo plástico, deixando a mistura húmida solta a curar (processo este também chamado de apodrecimento, devido ao cheiro que se desenvolve), há uma diminuição da plasticidade, o solo torna-se friável e facilmente se desagrega. A argila, agora formada por partículas de maiores dimensões, perde plasticidade, coesão e expansibilidade, e aumenta a sua trabalhabilidade.

Para atingir estes benefícios, basta utilizar uma pequena quantidade de cal.

A ação de cimentação exige bastante tempo, sendo por isso uma reação lenta, o que a torna responsável pela ação a longo prazo da cal na estabilização. É designada por reação pozolânica e acontece sob condições climáticas quentes, podendo ser acelerada com recurso a aditivos adequados. Promove a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio pela reação entre a cal, a sílica e a alumina livres nas partículas de argila.

Por último, a reação de carbonatação que é a reação da cal com o dióxido de carbono da atmosfera. Esta consiste na alteração química dos minerais argilosos devido à reação do ião carbonato ou bicarbonato com qualquer substância mineral, principalmente com iões cálcio dos minerais, formando carbonato de cálcio. Esta é a reação inversa da produção de cal a partir do calcário, e deve ser evitada uma vez que os carbonatos de cálcio e

magnésio formados prejudicam a reação pozolânica, impedindo o alcance da resistência desejada (Castro & Serafim, 1974).

A identificação das propriedades físico-químicas da cal torna-se essencial para a sua aplicação na estabilização de solos. Uma das principais propriedades a ter em conta é a granulometria, uma vez que influencia várias propriedades da mistura solo-cal, como por exemplo: a velocidade de hidratação, o peso volúmico e também a homogeneidade. A granulometria da cal é condicionada pela granulometria da rocha calcária, pelo processo de calcinação, pelo produto obtido (cal viva ou cal apagada) e por possíveis moagens suplementares devido às diferentes utilizações que podem ser atribuídas à cal.

Estabilizar com cal é sobretudo indicado para os solos com fração fina muito plástica e expansiva. O material inicia o processo de cimentação, fortifica e torna-se mais granular, podendo assim considerar-se um material agregado com partículas de maiores granulometria e ângulo de atrito. A estabilidade assim alcançada melhora a resposta dos solos em relação aos movimentos de assentamento ou deslizamento, possibilitando a sua utilização em aplicações estruturais.

A cal é umas das técnicas mais antigas de consolidação, no tratamento de solos para construção de estradas (Figura 2.16).



Figura 2. 16: Aplicação de cal no tratamento de solo de uma estrada.

2.7.2 Cimento

Estabilizar um solo através da adição de cimento consiste em preparar uma mistura homogénea de solo pulverizado, cimento e água, em proporções determinadas, em que a

ação estabilizante do cimento pode ocorrer segundo dois mecanismos distintos, consoante o teor que é adicionado ao solo (Cruz& Jalali, 2009).

Quando os teores em cimento são mais elevados, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo, este mecanismo permite o aumento da resistência mecânica devido à ação aglutinante do aditivo. Já para teores de cimento mais baixos, verifica-se, fundamentalmente, uma modificação da fração argilosa do solo, que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo.

No que toca à quantidade de água nas misturas de solo-cimento esta corresponde ao teor em água ótimo para a compactação, obtido através do ensaio Proctor na mistura de solo e cimento. O grupo de estudos CRAterre recomenda percentagens de cimento entre 6 a 10% na estabilização de solos para a construção em terra.

No fabrico de BTC é correntemente utilizado o cimento como estabilizante. Contudo, a produção de cimento, acarreta um consumo energético significativo e é um forte promotor de poluição, não se apresentando como um material ecológico e sustentável.

Assim sendo, e com vista às metas exigidas para redução do consumo energético, assim como, a diminuição da poluição no setor da construção civil, têm sido desenvolvidos estudos com vista à introdução de novos estabilizadores de solos, como é o caso das cinzas volantes.

2.7.3 Cinzas Volantes

Com o objetivo de melhorar as características do solo residual granítico, a Universidade do Minho e a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, realizaram um estudo sobre a estabilização do solo através da ativação alcalina de cinzas volantes, de forma a melhorar as suas características mecânicas.

As cinzas volantes são um resíduo resultante da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão que foi queimado numa central termoelétrica. Como as cinzas volantes apresentam propriedades pozolânicas importantes, são largamente utilizadas como aditivos em argamassas e betões. Para

além de contribuírem consideravelmente para a redução dos custos de fabrico do betão e argamassas, ainda lhe proporcionam maior resistência e durabilidade.

As cinzas volantes são importantes para o processo de ativação alcalina, pois ao serem constituídas maioritariamente por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) representam uma fonte de silício e alumínio. Exibem também atividade pozolânica reagindo à temperatura normal e em presença de água com o hidróxido de cálcio e com o alcali para formar hidratos de silicato de cálcio, responsável pela capacidade de presa.

Segundo Teixeira Pinto (2002), a ativação alcalina ou geopolimerização apresenta-se como uma técnica inovadora com enormes potencialidades. Permite incorporar todo o tipo de resíduos ricos em sílica e alumina na obtenção de bases ligantes, estas matrizes cimentícias aumentam a capacidade de confinamento de resíduos tóxicos radioativos, metais pesados, entre outros.

Devido a todas as propriedades estudadas, a estabilização do solo com ativação alcalina de cinzas volantes, revelou-se um método muito eficaz para a produção de BTC com solo residual granítico do Minho. .

O estudo efetuado relevou-se também bastante interessante do ponto de vista ambiental, uma vez que os materiais utilizados para promover a melhoria do solo, apresentam baixos valores de emissões de CO_2 , quer pela sua utilização, quer pelo seu processo de fabrico, apresentando, ainda a vantagem da incorporação de um resíduo resultante da queima de carvão (Soares, 2013).

2.8 Comportamento térmico das construções em terra

Relativamente ao comportamento térmico, os materiais são mais eficazes quanto menor for o seu coeficiente condutibilidade térmica, pois nesse caso será maior a resistência térmica desse material (R) e menor o coeficiente de transmissão térmico (U), do elemento construtivo do qual faz parte o material, gerando menos perdas de energia para o exterior da habitação.

Uma das mais interessantes características das paredes de terra tem que ver não com o seu nível de isolamento térmico, mas sim com a sua elevada inércia térmica, ou seja,

com a sua capacidade para armazenar e gerir o calor que recebe, seja de fontes solares ou outras, com resposta diferida temporalmente. Contudo, este é um tema que merece ainda ser objeto de aprofundadas investigações.

Ao longo dos anos têm sido efetuados estudos com vista à caracterização do comportamento térmico das diferentes técnicas de construção em terra. Inquéritos levados a cabo por Maniatidis & Walker (2003) a residentes de habitações construídas com taipa à base de calcite, na região de Amesbury, na Inglaterra, salientam que o ambiente interior das habitações é bastante agradável, sendo quente no Inverno e fresco no Verão.

Parra-Saldibar & Batty (2006) analisaram o comportamento térmico de construções em adobe, observando que o seu desempenho está dependente do seu teor de água e que, conseqüentemente, as construções executadas com este material, são muito influenciadas pelos ciclos de molhagem e de secagem.

Quintino (2005) refere valores do coeficiente de transmissão térmico, de $0,208\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$, em em paredes de 30 cm de espessura fabricadas em blocos de BTC

Segundo Goodhew & Griffiths (2005), as paredes tradicionais à base de terra utilizadas na região da Grã-Bretanha, conhecidas como “cob walls”, apresentam para uma espessura de 60 cm, valores do coeficiente de transmissão térmico (U), que são aproximadamente o dobro do valor admissível em termos regulamentares naquele país e que é de $0,35\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Este autor sugere diversos tipos de paredes à base de terra, que respeitam o valor definido em termos regulamentares e adianta ainda que é possível aumentar o desempenho térmico das paredes de terra das habitações tradicionais, cumprindo o valor mínimo regulamentar, com a utilização de um isolamento térmico no interior da habitação.

Com a crescente e necessária procura por novas técnicas construtivas, torna-se fundamental o estudo aprofundado do comportamento térmico das diferentes técnicas construtivas em terra. Uma vez verificado que a construção com BTC apresenta inúmeras vantagens, sendo um método bastante versátil e prático, torna-se imprescindível o estudo do seu comportamento térmico.

2.9 Regulamentação das construções em terra

Vários são os países que já possuem regulamentação no âmbito da construção em terra, o que demonstra a forma como esses países levam a sério este tema.

No entanto em Portugal o mesmo não se sucede. Essa falta de regulamentação acabava por também ser responsável pela ainda pouca aceitação deste tipo de construção no nosso país. Assim sendo, aos projetistas portugueses, não resta outra solução de forma poderem respeitar a segurança às ações sísmicas do que utilizar uma estrutura sismo resistente e utilizar as alvenarias de terra apenas como função meramente de compartimentação.

2.9.1 Regulamentação estrutural

Todos os projetos de edificações em terra são atualmente apreciados nas Câmaras Municipais, por parte dos seus técnicos, com base na mesma bitola que é utilizadas para os outros tipos de construção, uma vez que, estes não têm qualquer regulamento/norma nacional em que se possam basear para fazer a análise ao projeto (Parreira, 2007).

Em Portugal, a nível de estabilidade estrutural, a regulamentação para a construção que existe é o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 2005). A construção destes edifícios de terra é feita na base da experiência adquirida ou transmitida por pessoas mais idosas que ao longo dos anos ganharam experiência neste tipo de construções. A segurança estrutural dos edifícios construídos em terra é incerta no que respeita à sua vulnerabilidade a movimentos sísmicos. Estas incertezas levam a que se construa pouco neste tipo de material/solução, dado que os materiais mais modernos se adaptarem melhor ao regulamento existente (RSA, 2005).

A conjuntura sociocultural das sociedades modernas tem vindo a apelar a uma construção mais sustentável sendo por isso importante a sua regulamentação para que não surjam dúvidas em relação aos problemas ao nível estrutural e que, geralmente, geram desconfiança sobre este tipo de construção.

Vários são os países que já possuem regulamentação no âmbito das construções em terra. Países como: o Peru, os Estados Unidos da América (no estado Novo México) e a Nova Zelândia, o que demonstra a seriedade com que este tema é encarado nesses países.

Tal como em Portugal, Espanha não dispõe de um regulamento específico para a construção em terra. No trabalho “Earth Building in Spain” (Delgado e Guerrero, 2006), é apresentada uma compilação da regulamentação geral espanhola, onde se encontram algumas normas com indicações e valores de referência para a arquitetura em taipa e de adobe.

No Peru foi criada e adotada a Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe (Balasco e Travezano, 1999) que, como o nome indica, só aborda a técnica de construção em terra com adobe. Nesta norma são referidas indicações relativamente às características mecânicas que os adobes devem ter, assim como, o comportamento e a dimensão da alvenaria em adobe.

O método é simples, aplica-se só a pequenos edifícios de baixo custo (e com o máximo de dois pisos) e visa a resistência às ações sísmicas, de modo a evitar o colapso destes edifícios. Também é apresentada uma solução com elementos estruturais verticais, em betão (pilares), ou em pilares construídos em adobe. Já os elementos estruturais horizontais (pórticos, vigas e lintéis) podem ser em madeira ou betão. As paredes de alvenaria entre estes elementos são de fiadas de adobe reforçadas na direção horizontal e vertical com canas ou outro material semelhante. Esta preocupação da ligação entre a alvenaria e os elementos estruturais, deverá garantir uma boa transmissão de esforços a estes elementos.

Neste regulamento constam as dimensões para a espessura das paredes, assim como, a localização das aberturas e as dimensões das fundações. O regulamento indica ainda a forma de construir em terra, ou seja, a técnica de construção em terra com blocos de adobe, onde também constam indicações importantes sobre a sua resistência sísmica.

Quanto ao regulamento Americano designado de “*New Mexico Earthen Building Materials Code*” (New México, 2003), aborda três técnicas distintas de construção em terra. Aborda as técnicas de construção em taipa, da construção em adobe e a construção em BTC.

Este código só é aplicado a edifícios no máximo de dois pisos, estabelecendo os objetivos e os requisitos mínimos para a construção em terra. Nele são abordados temas como a análise sísmica de uma construção em taipa – importante neste tipo de construção –, assim como, as dimensões das paredes, as características mecânicas dos materiais a utilizar, bem como, a realização dos testes para obter as resistências dos

materiais usados na construção. Aborda também a utilização de vigas de bordadura e vigas de fundação, como as ligações entre os vários elementos estruturais.

O país que, a nível mundial, tem um regulamento mais completo para construção em terra é a Nova Zelândia,. Este regulamento está estruturado em 3 partes. A cada uma das partes corresponde uma norma. As normas são:

- NZS 4297: *Engineering Design of Earth Buildings (NZ4297, 1998)*;
- NZS 4298: *Materials and Workmanship for Earth Buildings (NZ4298, 1998)*;
- NZS 4299: *Earth Buildings Not Requiring Specific Design (NZ4299, 1998)*.

Todas as técnicas construtivas em terra – taipa, adobe e BTC –, são abordadas por este regulamento.

A norma NZS 4299 regula as construções em terra que não necessitam de projeto de dimensionamento específico. Assim, desde que sejam cumpridas as regras e não se excedam as limitações enunciadas é possível construir um edifício dispensando um dimensionamento mais complexo. No final desta norma, é apresentado um modelo de cálculo simples onde se verifica a segurança do edifício (NZ4298, 1998).

Caso se pretenda construir um edifício que ultrapassasse os pressupostos da norma NZS 4299, passa ser necessário aplicar o disposto na norma NZS 4297, uma vez que este possui informações para o dimensionamento mais específico do edifício. Esta norma, a NZS 4299, possui um conjunto de regulamentações fáceis de interpretar e que podem ser utilizadas por qualquer pessoa. Já a norma NZS 4297 exige alguns conhecimentos em engenharia. As construções em terra têm limites e regras impostas, relacionadas com:

- A área por piso;
- A limitação ao número de pisos;
- Altura máxima das paredes;
- O peso da cobertura do edifício;
- A largura e dimensão dos vãos bem como espaçamento entre as aberturas;
- Os lintéis sobre estes e a disposição em planta das paredes;
- A utilização de vigas de bordadura e de fundação em todas as paredes.

A NZS 4298 aborda os aspetos relacionados com material a utilizar na construção, de modo a garantir que esta tenha uma boa qualidade. Nesta norma são abordados temas relacionados com como se deve constituir em terra, a resistência mecânica desta construção, as características de comportamento e diferentes testes e ensaios experimentais que se devem efetuar antes do início da construção do edifício. Aborda também como devem ser efetuadas as juntas e os materiais a utilizar nas mesmas, assim como, o revestimento das paredes exteriores. Nesta norma são ainda abordados temas relacionados com a durabilidade dos materiais e da construção, o comportamento térmico, a resistência do edifício ao fogo, as ligações entre os vários elementos bem como, vários pormenores construtivos para cada uma das técnicas de construção em terra.

Depois de efetuada a revisão bibliográfica acerca da regulamentação existente para as construções em terra, e uma vez que a construção com BTC apresenta inúmeras vantagens, constata-se, mais uma vez, a importância do estudo e da criação de regulamentação específica, ou adaptação da existente, para este tipo de técnica quer a nível nacional como a nível mundial.

2.9.2 Regulamentação do comportamento térmico para BTC

O novo Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH) – (decreto-lei n.º 118/2013 de 20 de agosto) surge da atualização do antigo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

No REH (Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação) a definição de requisitos e a avaliação de desempenho energético dos edifícios passa a basear-se nos seguintes pilares:

- Edifícios de habitação: assumem posição de destaque o comportamento térmico e a eficiência dos sistemas;
- Edifícios de comércio e serviços: acresce a instalação, a condução e a manutenção de sistemas técnicos.

Para cada um destes pilares são, ainda, definidos princípios gerais, concretizados em requisitos específicos para edifícios novos, edifícios sujeitos a grande intervenção e edifícios existentes.

Para proceder à verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade térmica dos BTC realizados com solo residual granítico da região Minho, é necessário proceder ao cálculo do respetivo coeficiente de resistência térmica de forma a proceder à sua completa caracterização. Uma vez caracterizada a resistência térmica dos BTC, e em conjunto com outros estudos efetuados na Universidade do Minho, tais como: acústica, mecânica, desgaste, é possível avaliar todo o seu potencial como nova técnica construtiva.

2.10 Considerações finais

Caracterizada por baixos consumos de energia e de emissões de carbono, por estar associada a baixos ou quase nulos níveis de poluição, a construção em terra possui assim vantagens competitivas face à construção corrente que lhe asseguram um futuro promissor.

No diz respeito a Portugal, o futuro da construção em terra passa, em primeiro lugar, pelo reconhecimento institucional da importância deste tipo de construção, traduzido em regulamentação própria. Em segundo lugar, pelo fomento de uma política formativa que contemple as especificidades técnicas e científicas desta área e que permita uma generalização daquilo que já é feito atualmente em termos formativos, mas agora à escala nacional. Este panorama não é exclusivo de Portugal, sendo que outros autores apontam alguns dos pontos a melhorar no desenvolvimento da construção em terra (Shittu, 2008a), tais como:

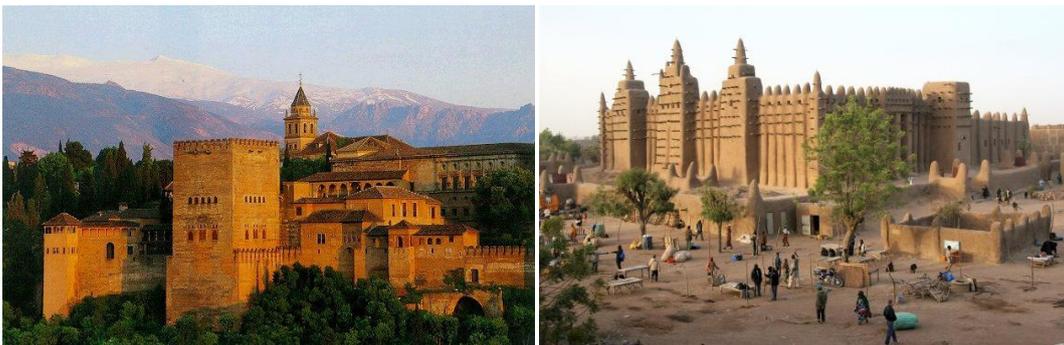
- Falta de trabalhadores qualificados nas artes da construção e reconstrução de edifícios em terra;
- Ausência de instituições que formem profissionais de construção em terra;
- O facto de a construção em terra estar associado às camadas populacionais com menos recursos económicos;

Sendo assim, sem que as condições enunciadas anteriormente estejam cumpridas dificilmente a população civil deixará de olhar para esta construção como sendo algo que só pode contentar aqueles que não têm recursos financeiros para terem uma habitação construída em moldes correntes

2.11 Curiosidades

A construção em terra surge em cerca de 17% das construções classificadas como património da Humanidade pela UNESCO.

De região para região é possível verificar a versatilidade da construção em terra, através das diversas técnicas utilizadas de acordo com o clima, a cultura, a economia da região e claro, as características do próprio solo como material de construção.



a)

b)

Figura 2. 17: Construções em terra classificadas como património da humanidade pela UNESCO:
a) Alhambra em Espanha; b) Torres de Djenné no Mali.

Alhambra em Espanha: A maior parte do complexo foi construído, principalmente, entre 1248 e 1354, nos reinados de Maomé I e dos seus sucessores. Alhambra é caracterizada por uma mistura de elementos naturais com outros feitos pela mão do homem, sendo um testemunho da habilidade dos artesãos muçulmanos da época.

Torres de Djenné no Mali: A Grande Mesquita de Djenné é o maior edifício em adobe do mundo, e é considerada por muitos arquitetos como a maior realização do estilo Sudano-Saheliano, embora tenha muitas influências islâmicas. Localiza-se na cidade de Djenné, no Mali, a qual foi declarada como património mundial pela Unesco em 1988. A mesquita foi construída em 1280 por Koy Konboro, o 26º rei de Djenné, no lugar do seu antigo palácio. No final do século XIX, no entanto, à medida que o número de crentes diminuía a mesquita foi caindo em ruínas. A mesquita foi reconstruída com o seu aspeto original em 1906. Apesar de não haver nenhum documento relatando o aspeto da mesquita, através dos relatos de anciões foram iniciados os trabalhos na mesquita. A construção terminou no ano seguinte.



a)

b)

**Figura 2. 18: Construções em terra classificadas como património da humanidade pela UNESCO:
a) Cidade de Bam no Irão; b) Ksar de Ait Ben Hadu em Marrocos.**

Cidade de Bam no Irão: Foi a maior cidade do mundo construída em adobe e hoje é Património da Humanidade. Esta cidade foi construída na Rota da Seda no ano de 550 AC e permaneceu habitada até 1850 DC. Não se conhecem as causas de seu abandono. Infelizmente, em 26 de dezembro de 2003, a cidade foi quase que completamente destruída por um terremoto. A cidade está a ser reconstruída.

Ksar de Ait Bem Hadu em Marrocos: Os edifícios são construídos com tijolos de terra secos ao sol, podem ter 4 ou 5 andares, excepcionalmente 6 ou 7, e as torres são invariavelmente decoradas com motivos geométricos, particularmente as casas mais nobres. Os materiais utilizados nestes género de arquitetura exigem naturalmente uma manutenção atenta e permanente. Pelo menos uma vez por ano, logo a seguir à estação das chuvas, é necessário inspecionar minuciosamente as fissuras e os canais de drenagem da água.

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO DE FABRICO DOS BTC

3.1 Introdução

A construção em terra tem vindo a ser cada vez mais reconhecida e aceite como alternativa à construção dita convencional. Contudo, o seu maior obstáculo prende-se com o facto destes materiais (terra) em geral não serem considerados materiais normalizados.

A necessidade de se adotarem soluções construtivas mais sustentáveis na indústria da construção tem levado ao melhoramento dos materiais de terra e dos respetivos processos construtivos. A construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC) é provavelmente o caso mais relevante deste melhoramento, onde este tipo de construção pode ser visto como uma modernização da alvenaria de adobe.

Os BTC são produzidos com recurso a prensas, onde a terra húmida é compactada estaticamente num molde específico para formar o bloco, que é imediatamente desmoldado e posto a secar. Assim sendo, este processo permite uma uniformização da geometria dos BTC e um aumento considerável da sua densidade, relativamente a unidades de adobe, assim como promove uma resistência mecânica bastante superior.

No caso de o solo disponível não apresentar características adequadas, a estabilização química por adição de cal ou cimento é outra forma de melhoramento comum no processo de fabrico de BTC. No entanto, este processo visa o aumento da resistência mecânica e diminuição da vulnerabilidade à água, mas aumenta a energia incorporada dos BTC (Houben e Guillaud 2008, Reddy e Kumar 2010, Lax 2010), tornando esta solução construtiva menos atrativa do ponto de vista económico e ambiental.

Com o objetivo de diminuir o impacto ambiental da estabilização química convencional neste tipo de aplicações, tem sido estudada a estabilização através da ativação alcalina de cinza volante em aplicações geotécnicas (Cristelo et al. 2011, Cristelo et al 2012a) e construção em taipa (Silva et al 2013). Tendo sido demonstrado que a estabilização de solos com ativação alcalina é capaz de atingir níveis de resistência semelhantes à estabilização com cal e cimento (Cristelo et al. 2012b).

Assim sendo, procedeu-se à estabilização dos BTC com cinza volante, de forma a produzir resultados semelhantes aos referidos anteriormente, assim como melhorias relativas à mitigação do impacto ambiental.

Neste terceiro capítulo é descrito todo o processo de fabrico dos BTC utilizados para construção da parede de ensaio, bem como a caracterização dos diferentes materiais necessários à produção dos mesmos.

3.2 Descrição dos materiais utilizados

A base da constituição dos BTC é a terra em que é adicionada água numa proporção adequada e eventualmente um estabilizador.

Uma vez que o solo utilizado (solo residual granítico) não apresenta as características adequadas, procedeu-se à sua estabilização com cinzas volantes. A ativação alcalina de cinza volante resulta num ligante geopolimérico, que quando misturado com solo, forma uma matriz semelhante a uma matriz cimentícia. Esta matriz endurece com o tempo e envolve as partículas de solo, promovendo um aumento da sua resistência.

No caso em estudo, construção em alvenaria de blocos de terra comprimida, utilizou-se solo residual granítico da região do Minho, localizada no Norte de Portugal. Como forma de estabilização do solo utilizaram-se cinzas volantes ativadas alcalinamente.

3.2.1 Solo residual granítico

Entende-se por solo residual granítico o material derivado dos processos de alteração e decomposição “*in situ*” de maciços rochosos, que não tenham sido transportados do seu local de origem, por ação do vento, da chuva, de ciclos de gelo/degelo, de organismos, entre outros.

Os solos residuais graníticos são compostos não apenas por grãos, mas de agregados, cristais de minerais alterados e partículas de resistência variada. Por isso, é fundamental um conhecimento aprofundado da sua composição para melhor compreensão do seu comportamento.

No desenvolvimento desta nova constituição de materiais para fabrico dos BTC, utilizou-se solo residual granítico da região (SRG) Minho do Norte de Portugal. O SRG utilizado foi recolhido na localidade de Louredo em Guimarães. As suas propriedades foram analisadas por Faria (2012) em termos de granulometria (LNEC E196), limites de consistência (NP 143), baridade seca máxima e teor ótimo em água (LNEC E197). Na Tabela 3.1 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 3. 1: Análise do solo residual granítico do Minho (Faria, 2012)

Ensaio	Propriedades	Parâmetros	Resultados obtidos
Análise granulométrica	Textura	Gravilha (%)	22
		Areia (%)	60
		Silte (%)	14
		Argila (%)	4

(continua)

(continuação)

Limites de consistência	Plasticidade	Limite de liquidez (%)	28
		Limite de plasticidade (%)	-
		Limite de retração (%)	26
		Índice de plasticidade	-
		Índice de retração	2
Densidade das partículas	Textura	Peso específico dos grãos (g/cm ³)	2,62
Ensaio de Proctor	Compactação	Teor em água ótimo (%)	12,1
		Baridade seca máxima (g/cm ³)	1,71

Com base nestes resultados Silva et al (2013) procederam à avaliação e caracterização do solo residual granítico da região Minho de forma a entender a adequabilidade deste solo para a construção em terra, nomeadamente para a sua utilização em BTC. Assim, efetuaram comparações com as recomendações de forma a verificar se existia, ou não, a possibilidade de utilizar o solo residual granítico não estabilizado para produção de BTC.

Na Figura 3.1 apresenta-se a curva granulométrica do SRG comparada com a envolvente recomendada por Houben e Guillaud (2008) para o fabrico de BTC. Segundo Silva et al (2013), da análise da Figura 3.1 observa-se que o SRG apresenta uma percentagem de finos bastante baixa, especialmente no que diz respeito à fração argilosa, cuja percentagem é de cerca de 4%. De uma percentagem de argila tão baixa espera-se problemas no processo de fabrico, nomeadamente na obtenção de uma coesão inicial dos BTC para a desmoldagem e manuseamento imediatos. A falta de resistência dos BTC é outra consequência esperada desta situação.

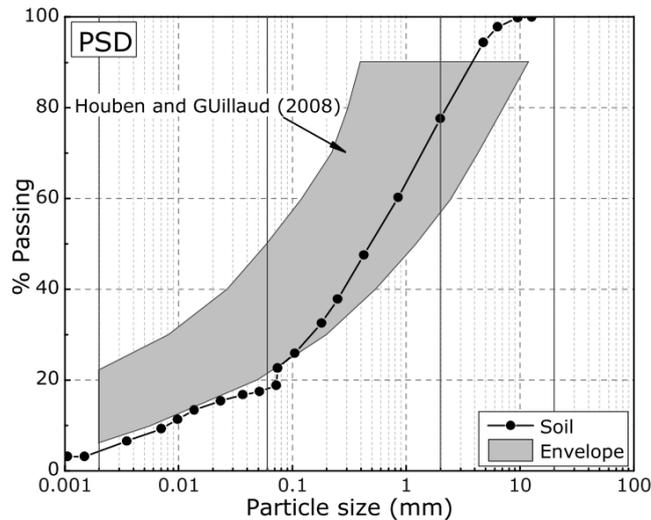


Figura 3. 1: Comparação entre os resultados obtidos e o fuso recomendado por Houben e Guillaud (2008).

Através dos limites de consistência é possível identificar a insuficiência da percentagem de argila. Não tendo sido possível determinar o limite de plasticidade e o limite de liquidez é de cerca de 28%. Assim sendo o SRG classifica-se como um solo não plástico.

O valor obtido para o teor ótimo em água foi de cerca de 12% e para a baridade seca máxima foi de cerca de 1,71 g/cm³, o que indica que os BTC fabricados com o solo natural poderão apresentar resistência mecânica insuficiente. De acordo com Doat et al. (1991), o uso de um solo com uma baridade máxima entre 1,65 g/cm³ e 1,76 g/cm³ resulta, provavelmente, num material de terra com desempenho bastante fraco.

Assim sendo, a única característica positiva do SRG para a construção em terra, é a dimensão máxima das partículas, que estão dentro do valor recomendado pelas normas referidas, evitando-se a necessidade de peneiração do solo. Assim, a inadequabilidade do SRG recolhido para o fabrico de BTC no seu estado natural, implica a prévia estabilização química.

3.2.3 Cinzas volantes

Cinzas volantes é a designação dada ao material obtido pela precipitação eletrostática, ou captação mecânica em filtros de saco ou dispositivos semelhantes, das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão. A designação de volantes resulta da leveza das partículas, as quais, na ausência de dispositivos de filtração, seriam arrastadas pelos gases para a atmosfera como fumo.

As cinzas volantes são um pó mineral fino, em grande parte constituído por pequenas partículas esféricas com dimensões que variam entre 0,5 µm e 100 µm, que resulta da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão que foi queimado a altas temperaturas e pressões. Os grãos de cinza são sólidos amorfos que ganham a sua estrutura tendencialmente esférica por solidificarem em suspensão no fluxo gasoso resultante da queima.

Dado que estas cinzas apresentam propriedades pozolânicas acentuadas, são em geral valorizadas pela sua utilização como aditivo em argamassas e betões. Por este motivo, são as pozolanas artificiais mais comuns, e são utilizadas como aditivo numa grande variedade de produtos.

Dada a sua origem nas impurezas minerais contidas no carvão, as cinzas são maioritariamente constituídas por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Assim, são uma interessante fonte de alumínio e silício para geopolímeros. Exibem, também, atividade pozolânica, reagindo à temperatura normal e em presença de água com o hidróxido e com álcalis para formar hidratos de silicato de cálcio. Estes compostos têm capacidade de presa, isto é, atuam como cimento em agregados.

Em função da sua composição e da sua atividade pozolânica, as cinzas volantes são classificadas pela norma ASTM C618 em 2 categorias: cinzas volantes da classe F e cinzas volantes da classe C. As cinzas da classe C, apresentam alto teor de cálcio e características aglomerantes. Por outro lado, as cinzas da classe F, apresentam baixos teores de cálcio, e propriedades não aglomerantes, necessitando de um agente de cimentação como o cimento, a cal viva, a cal hidratada ou, em alternativa, um ativador químico, como o silicato de sódio, que poderá conduzir à formação de um geopolímero (Soares, 2013).

Tal como já foi referido, a estabilização dos BTC foi realizada através da ativação alcalina de cinza volante. A cinza volante foi obtida da central termoelétrica PEGOP, e é caracterizada por uma baixa percentagem de cálcio (tipo F) e por uma massa disponível para dissolução (Si e Al) de cerca de 71%.

3.2.4 Ativador alcalino

De acordo com Teixeira Pinto (2002) a ativação alcalina apresenta-se como uma técnica inovadora com enormes potencialidades, uma vez que, permite incorporar todo o tipo de resíduos ricos em sílica e alumina na obtenção de bases ligantes.

Comparando o desempenho das argamassas usadas atualmente, com as argamassas antigas, presentes em edifícios antigos, verifica-se que as argamassas antigas apresentam melhor comportamento, nomeadamente no que diz respeito à resistência à ação dos ácidos, bases e a ciclos de gelo-degelo ou de molhagem secagem.

Devido a estas conclusões tornou-se necessária a investigação da natureza das argamassas antigas, de forma a melhorar as atuais. Conseguiu-se perceber, que a durabilidade dos seus ligantes se deve fundamentalmente à sua constituição, formada em grande parte por minerais cristalinos naturais, compostos por alumino-silicatos hidratados de metais alcalinos (Na, K) e alcalinoterrosos (Ca, Mg), que se formam essencialmente quando as cinzas volantes se depositam em ambientes fortemente alcalinos (Teixeira Pinto, 2006).

Para a ativação alcalina das cinzas volantes foi utilizado um ativador alcalino constituído por uma mistura de hidróxido de sódio com silicato de sódio. O hidróxido de sódio foi originalmente adquirido em estado sólido com uma baridade de cerca de $2,13 \text{ g/cm}^3$ (a 20°C) e grau de pureza de cerca de 95 a 99%. Este material foi dissolvido em água de forma a obter-se uma concentração de cerca de 12,5 mol antes de ser misturado com o silicato de sódio. O silicato de sódio foi adquirido em solução com uma densidade relativa de cerca de 1,45, uma percentagem de óxido de sódio (Na_2O) de cerca de 13% e rácio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de cerca de 2.

3.3 Quantidades dos materiais utilizados

Depois de definidos todos os materiais utilizados no fabrico do BTC, torna-se necessária a definição das quantidades utilizadas. Na Tabela 3.2 estão descritas as quantidades de material a utilizar para a produção de 1 BTC, e para a produção de 10 BTC, considerando uma percentagem de perdas de material de cerca de 5% para ambos os casos. Para a pesagem dos constituintes foi utilizada uma balança digital com capacidade para 150 Kg e uma precisão de 50 gramas.

Tabela 3. 2: Quantidades de material utilizado para produção de BTC.

	Cinzas (g) (15%)	Solo (g) (85%)	Ativador (g) NaOH ₂ + Na ₂ OSiO ₂	NaOH ₂ sólido (g)	Na ₂ SiO ₂ (g)	Água para NaOH ₂ (g)
1 BTC	980,04	5553,53	895,10	198,91	298,37	397,82
10 BTC	9 800,40	55535,30	8 951,00	1 989,10	2 983,70	3 978,20

Para otimizar o processo de produção de BTC e conservar a trabalhabilidade da mistura necessária para a sua prensagem, foram sempre efetuadas misturas para a produção de 10 BTC.

3.4 Geometria dos BTC

A geometria adotada para os blocos fabricados consiste em uma unidade com dupla perfuração vertical conforme se pode verificar na Figura 3.2.

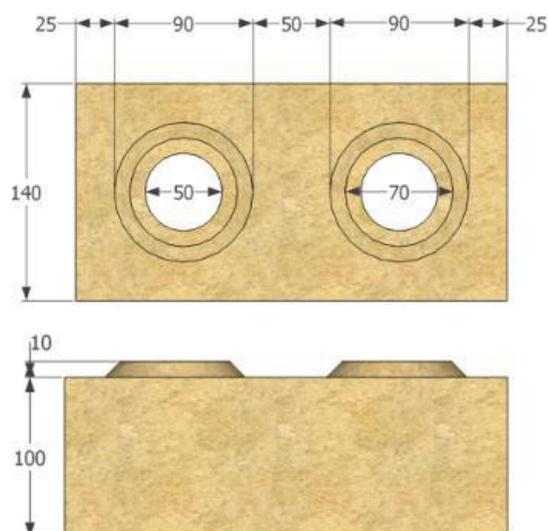


Figura 3. 2: Geometria dos BTC (Sturm et al., 2013)

Esta geometria dos BTC permite a construção de alvenaria com junta seca, simplificando o seu processo construtivo e diminuindo o tempo de construção. Neste caso, o travamento dos BTC é garantido por um sistema de encaixe. Estes BTC podem ser utilizados para construção de paredes de pano duplo e de pano simples.

Na Tabela 3.3 apresentam-se as dimensões dos BTC.

Tabela 3. 3: Dimensões dos BTC

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)
280	140	100	50	352,7	3527

3.5 Processo de produção dos BTC

Aos estudos efetuados anteriormente houve a necessidade de lhes dar continuidade, analisando assim a possibilidade de produzir BTC com solo residual granítico do norte de Portugal (Silva et al. (2014)).

Estudadas todas as características deste solo verifica-se a sua não adequabilidade em estado puro para produção de BTC, sendo necessária a sua estabilização química. Assim

sendo, foi realizado um estudo sobre a composição dos BTC envolvendo estabilização por adição de cimento, por lamas provenientes de uma estação de tratamento de águas e por ativação alcalina de cinzas volantes. Uma vez que se verificou que a composição com estabilização por ativação alcalina de cinzas volantes, com uma percentagem de cinzas volantes de 15%, foi a que apresentou valores de resistência à compressão mais elevados, adotou-se, assim, esta composição para o fabrico dos BTC, objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 3. 4: Composição da mistura de BTC

Cinzas volantes	15%
Componentes líquidos/ Componentes sólidos	0,137
Concentração de NaOH2	12,5mol
Silicato de sódio/ Hidróxido de sódio	0,5

Depois de analisadas todas as características do SRG e de definidos todos os novos constituintes, de forma a melhorar as características dos BTC, o passo seguinte foi a sua produção.

O processo de produção dos BTC divide-se em 6 fases distintas:

- Preparação dos materiais;
- Pesagem dos materiais necessários;
- Preparação da mistura numa misturadora de eixo vertical;
- Pesagem da quantidade necessária para cada BTC;
- Prensagem dos BTC;
- Cura dos BTC.

Para a realização do ensaio de caracterização do comportamento energético foram produzidos BTC para a construção de uma parede simples de dimensões 2,70×4,10 metros.

3.5.1 Preparação dos materiais

- **Solo residual granítico**

A preparação do solo residual granítico da região Norte iniciou-se pelo processo de destorroamento com recurso a uma enxada, como forma de desfazer os torrões existentes, sem alterar a sua granulometria. Finalizado este processo, espalhou-se o solo num local arejado para permitir a sua secagem rápida e homogénea.

A secagem do solo foi efetuada sem controlo do seu teor de humidade, estando assim dependente da temperatura e teor de humidade relativa do ar durante o período de secagem. Quando o solo apresentou um aspeto mais claro e seco foi recolhido e armazenado. Este processo foi repetido várias vezes, até se ter a quantidade necessária para produção dos BTC



Figura 3. 3: Secagem do SRG

- **Ativador**

A preparação do ativador iniciou-se pela preparação da solução aquosa de hidróxido de sódio com uma concentração de 12,5 mol. Assim sendo, começou-se por pesar o hidróxido de sódio em estado sólido e a água. Para uma concentração de 12,5 mol, por cada kg de hidróxido são necessários 2kg de água.

Depois de pesado o hidróxido de sódio e a água, estes são misturados num recipiente plástico e agitados cuidadosamente até que o hidróxido de sódio se dissolva totalmente. Efetuada a solução aquosa é necessário esperar que arrefeça para se poder utilizar na mistura de BTC. Uma vez que este processo é bastante demorado, prepara-se uma quantidade de hidróxido suficiente para cerca de 80 BTC.

Para a realização deste processo é importante tomar algumas medidas de segurança, assim como a utilização de luvas para evitar queimaduras e de máscara para evitar a inalação dos gases que são libertados durante esta reação.

O silicato de sódio é constituído por óxido de sódio (Na_2O) e dióxido de silício (SiO_2) numa proporção de 1:2, tendo sido adquirido já em forma de solução. O silicato de sódio não é corrosivo, e é de fácil manuseamento, atóxico e não inflamável.



a)

b)

Figura 3. 4 :Ativador; a) Hidróxido de sódio no estado sólido; b) Mistura de hidróxido de sódio com água e silicato de sódio.

3.5.2 Pesagem dos materiais

Depois de preparado e solo e o ativador, procede-se à pesagem de todos os materiais constituintes da mistura dos BTC.

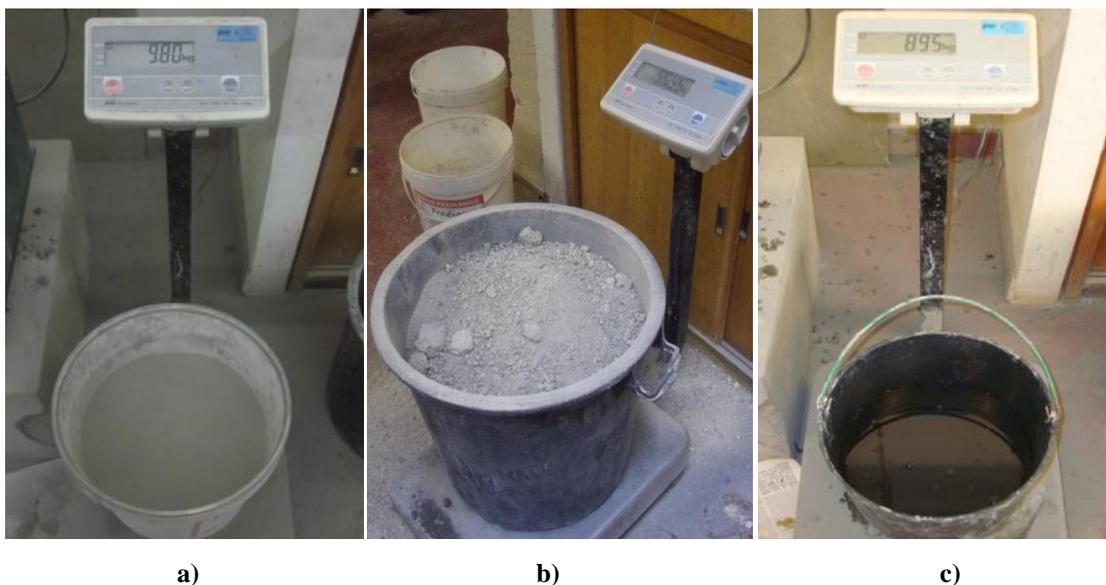


Figura 3. 5: Pesagem dos materiais; a) Cinzas volantes; b) SRG; c) Ativador.

Por cada mistura efetuada foi possível obter 10 BTC. Em seguida apresenta-se a quantidade necessária dos diferentes constituintes dos BTC para uma mistura (Tabela 3.5).

Tabela 3. 5: Quantidade para prensagem de 1 mistura

	Cinzas (Kg)	Solo (Kg)	Ativador (Kg)
1 Mistura	9,80	55,55	8,95

3.5.3 Preparação da mistura numa misturadora de eixo vertical

Depois de pesados os constituintes da mistura de BTC, procede-se à sua mistura numa misturadora de eixo vertical com três pás giratórias.

Inicialmente, procede-se à homogeneização do solo residual granítico com as cinzas volantes, introduzindo-se estes materiais na misturadora e misturados durante cerca de 5 minutos. Durante este tempo vai-se verificando se existem pedras grandes ou torrões que seja necessário retirar ou desfazer.

Em seguida adiciona-se o ativador à mistura solo e cinzas e durante algum tempo deixa-se na misturadora, verificando sempre a formação de grânulos, que resultam da aglutinação das partículas mais finas da mistura por adição da fase líquida, e que é necessário desfazer manualmente. Durante todo este processo de homogeneização é necessário parar a misturadora e, com uma colher de pedreiro, misturar o material seco que não é alcançado pelas pás da misturadora, de forma a obter uma mistura o mais homogênea possível.



Figura 3. 6: Mistura dos constituintes dos BTC

Para finalizar todo este processo, depois da mistura pronta, é retirada da misturadora para um carrinho de mão e transportada até ao local onde se irá prensar os BTC.

3.5.4 Prensagem dos BTC

Depois de pronta a mistura e de transportada para o local onde se irá proceder à prensagem dos BTC, é necessário proceder à pesagem da quantidade de mistura necessária para o fabrico de um BTC, neste caso, 7,05 kg (Figura 3.7).



Figura 3. 7: Pesagem da mistura para 1 BTC

A prensa utilizada para prensar os BTC é uma prensa manual Terstaram, que permite a aplicação de cerca de 2MPa de pressão. Antes de introduzir a mistura para 1 BTC na prensa esta é previamente oleada com um óleo descofrante, e em seguida introduzida a mistura que com as mãos é espalhada e nivelada (Figura 3.8 a)). Depois de comprimido o bloco na prensa, este é cuidadosamente retirado da prensa e colocado sobre uma tábua de madeira, de forma a tornar mais fácil o seu transporte ainda em estado fresco.



a)

b)

Figura 3. 8: Prensagem dos BTC; a) colocação da mistura no molde; b) BTC comprimido.

3.5.5 Cura dos BTC

Após a produção dos BTC, estes são deixados a secar sobre as tábuas de madeira durante algumas horas de forma a adquirirem alguma coesão para se conseguirem mover para o chão do laboratório, onde são deixados a curar.

Após cerca de uma semana, visto que os BTC já apresentam alguma resistência, estes são empilhados e continuam o seu processo de cura até serem utilizados na construção da parede. No entanto, apesar de os BTC já apresentarem alguma resistência, não se devem empilhar mais do que 4 ou 5 BTC, de forma a não os sobrecarregar, assim como deixar algum espaço entre os BTC para que possa circular o ar.



a)

b)

Figura 3. 9: Cura dos BTC; a) BTC em estado fresco; b) Empilhamento de BTC.

3.6 Considerações finais

Foram medidas a temperatura e humidade relativa durante cerca de 30 dias no local de cura dos BTC, apresentando uma temperatura média de 18°C e humidade relativa de 52%. De acordo com a norma EN 772-1, que propõe que durante o condicionamento dos provetes, seja garantida uma boa circulação de ar em torno destes, mantendo uma temperatura superior a 18°C e uma humidade relativa inferior a 65%, verifica-se que os valores obtidos respeitam o exigido na norma.

O facto de os BTC durante o processo de cura estarem expostos à atmosfera leva à ocorrência de eflorescências nas suas superfícies expostas ao ar, mudando a sua cor de cinza escuro para um tom próximo do branco (Figura 3.10). A ocorrência destas eflorescências são o resultado do sódio presente no ativador.



Figura 3. 10 : Eflorescências nos BTC

Capítulo 4

ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS BTC

4.1 Considerações iniciais

Até há bem pouco tempo, falar de construções em terra em Portugal, seria falar de construções utilizadas num passado distante por franjas populacionais de fracos recursos económicos, que impossibilitados de adquirir materiais modernos, tais como, o aço, o cimento ou o tijolo, apenas lhes restava utilizarem aquilo que a natureza fornecia gratuitamente, neste caso, a terra.

No entanto, nos últimos anos, a construção em terra tem vindo a ser alvo de um crescente interesse por parte da comunidade académica, sobretudo devido aos aspetos ecológicos, económicos e sociais que caracterizam este tipo de construção. Tendo em conta que, para além das várias vantagens relativamente à construção tradicional, como por exemplo: ser menos propensa a doenças do foro respiratório, apresentar menor poluição e gerar menos resíduos, a construção em terra apresenta ainda vantagens em termos de poupanças energéticas substanciais, sendo este último fator crucial para um país que tem no seu défice energético um dos seus mais graves problemas económicos e ambientais. Torna-se por isso importante o incentivo à construção em terra.

No seguimento deste importante incentivo à construção em terra e com vista ao desenvolvimento das técnicas de construção em terra, tal como já foi referido nos capítulos anteriores, a Universidade do Minho tem vindo a desenvolver uma série de investigações, nomeadamente através do estudo de formas de estabilização dos solos para BTC, desde o cimento até ao reaproveitamento e incorporação de resíduos industriais.

Nos últimos tempos, na Universidade do Minho, têm sido desenvolvidos estudos relativamente à recente técnica de construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC), com vista à demonstração do seu potencial como técnica construtiva. Com todos os estudos efetuados relativamente aos BTC, pretende-se a validação dos BTC fabricados com SRG e ativados alcalinamente como uma nova técnica construtiva.

Assim sendo, torna-se necessária a caracterização do comportamento térmico dos BTC. Para realização dessa caracterização foi efetuada a determinação do desempenho térmico de uma parede constituída por BTC no laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho. Para tal, foram realizadas várias medições. Numa primeira fase, as medições foram realizadas numa parede simples com junta seca. Posteriormente foram efetuadas as medições na mesma parede mas com as juntas barradas com betume. Por fim, foram realizadas medições com a parede simples com juntas barradas com betume, acrescida de 2cm de isolamento térmico pelo exterior, neste caso aglomerado de cortiça.

4.2 Ensaio térmico

O procedimento de ensaio para determinação do desempenho energético da solução construtiva foi realizado de acordo com as normas C1046 e C1155, de 2001, publicadas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*). A norma C1046 diz respeito à forma como devem ser utilizados e instalados os equipamentos de forma correta para medição de fluxos de calor e temperaturas superficiais de elementos. Já a norma C1155 respeita, principalmente, o método de cálculo e as regras para validação de resultados na determinação da resistência térmica dos elementos.

4.2.1 Materiais e equipamentos

Os materiais necessários para a realização dos ensaios são descritos na norma C1046, no seu ponto 6:

- a) Sensor de fluxo de calor;
- b) Sensor de temperatura;
- c) Gravador de dados;
- d) Materiais de ligação e de contato térmico;
- e) Dispositivos para controlo de absorção e emissividade.

De uma forma mais detalhada, os materiais utilizados foram os seguintes:

- a) Sensor de fluxo de calor

O sensor utilizado para medição do fluxo de calor através do elemento construtivo foi o fluxímetro de marca HUKSEFLUX, com o modelo HFP01SC *self-calibrating heat flux sensortm* (Figura 4.1).



Figura 4. 1 : Fluxímetros HFP01SC

- b) Sensor de temperaturas superficiais de elementos construtivos

Para a medição de temperaturas superficiais dos elementos construtivos em estudo foram utilizados termopares tipo T em cobre/constantan (Figura 4.2).



Figura 4. 2 : Termopares em tipo T em cobre/constantan

c) Gravador de dados

Para aquisição e armazenamento de dados, o equipamento utilizado foi um *dattalogger* de marca *Campbell Scientific* de modelo CR10X (Figura 4.3).



Figura 4. 3 : Dattalogger CR10X

d) Materiais de ligação e de contato térmico

Para a ligação dos dispositivos de medição aos elementos construtivos foi utilizada fita adesiva e patafix. Como material de contato térmico entre os fluxímetros e os elementos foi utilizada pasta dos dentes (Figura 4.4).



Figura 4. 4 : Materiais de ligação e contato térmico

No entanto, para realização dos ensaios foi ainda necessária a utilização dos seguintes equipamentos:

- e) Sensor de temperaturas do ar e humidade relativa

O sensor *HygroClip* HC2-S foi necessário para a calibração dos sensores de temperatura superficial dos elementos (Figura 4.5).



Figura 4. 5 : Sensor de temperatura do ar

- f) Ar condicionado

No compartimento interior da célula de ensaio, foi colocado um ar condicionado (*Daykin* FTXS50G2V1B) que permitiu regular a temperatura interior, de forma a obter uma diferença de temperaturas entre as faces interior e exterior da parede. Este gradiente de temperatura permite um fluxo de calor no elemento e dá maior representatividade aos resultados obtidos (Figura 4.6).



Figura 4. 6 : Ar condicionado

4.2.2 Seleção dos locais de medição

Para seleção dos vários locais de medição da parede optou-se por instalar os equipamentos de medição nos seguintes locais da parede:

- 1) Junta Vertical
- 2) Junta Horizontal
- 3) Encontro de juntas
- 4) Zona Centro do BTC
- 5) Zona Perfurada do BTC

4.2.3 Condições e instalação dos equipamentos para realização dos ensaios

Como já foi referido, os ensaios foram realizados no laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho, mais concretamente, nas células de teste constituídas por uma câmara de dimensões interiores de 2,47x4,03 metros, – com elevado isolamento térmico –, e um pórtico metálico móvel com dimensões interiores de 2,7x4,2 metros, que permitiu a construção da parede ensaiada.

O pórtico é movimentado através de um motor de baixa velocidade de rotação e com elevada potência, que, com recurso a um sistema de engrenagens, permite a deslocação do pórtico no sentido perpendicular ao plano da parede. Este tipo de movimentação do pórtico permitiu construir a parede de ensaio afastada da câmara de ensaio, dando maior espaço de manobra para construção da parede, assim como, para instalação dos equipamentos.

Após a construção da parede foi possível encostar a mesma à câmara de ensaio através da compressão de uma interface em material compactável (esponja), com densidade e resistência térmica elevadas. Isto permitiu a minimização de transmissões térmicas na interface parede/célula de teste.

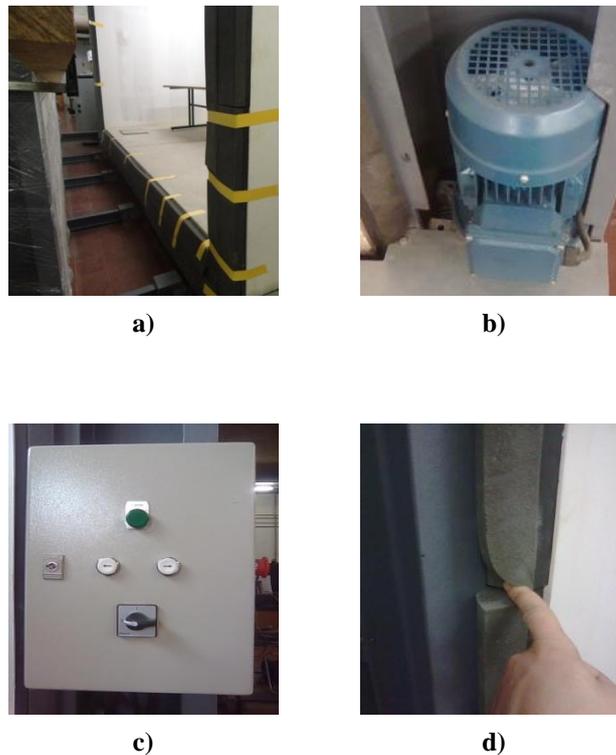


Figura 4. 7 : Condições de ensaio; a) câmara de ensaio; b) Motor de baixa velocidade de rotação e com elevada potência; c) painel para controlo de distância; d)material de interface entre parede e célula de teste.

Depois de construída a parede e de seleccionados os pontos em que se iriam efetuar as medições procedeu-se à colocação dos equipamentos de acordo com a norma C1046, de 2001, publicada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Inicialmente, instalaram-se os sensores de temperaturas superficiais, os termopares. Para a colocação dos termopares, de forma a estarem sempre em contato com o bloco e medirem a temperatura superficial, optou-se pela utilização de patafix. A colocação dos termopares foi efetuada nas duas faces da parede, interior e exterior, permitindo assim a medição das temperaturas superficiais nas duas faces.

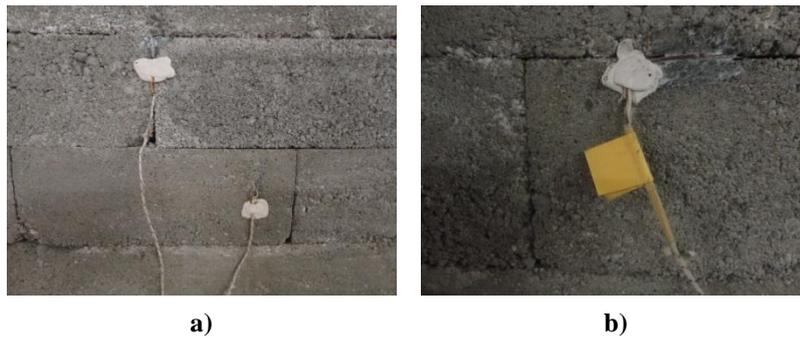


Figura 4. 8 : Instalação dos termopares: a) face interior da parede; b) face exterior da parede

Numa fase seguinte, procedeu-se à instalação dos sensores de fluxo de calor, os fluxímetros. Para a colocação dos fluxímetros e de acordo com a norma C1046, de 2001, publicada pela ASTM, é necessário a utilização de uma material de contato térmico, neste caso, a pasta dos dentes. Depois de colocada uniformemente a pasta dos dentes nos fluxímetros procedeu-se à sua fixação sob os termopares da face exterior da parede.

Por fim, e depois de instalados os termopares, os fluxímetros e de ligado o sensor de temperaturas do ar e humidade relativa, ligou-se o ar condicionado no interior da câmara, a uma temperatura ambiente de 18 °C. Desta forma, foi possível a obtenção de um gradiente de temperaturas entre as face interior e a face exterior da parede que permitiu um fluxo de calor no elemento e deu uma maior representatividade aos resultados.

Após a instalação dos equipamentos iniciaram-se as medições. Através do *datalogger* CR10X foram adquiridos e armazenados os dados.

4.2.3 Procedimento de cálculo

Com vista à determinação da resistência térmica dos BTC foram seguidos os procedimentos de cálculo descritos na norma C1155, de 2001, publicada pela ASTM.

De acordo com o ponto 5 da referida norma, importa referir que, uma vez que a parede ensaiada foi construída em ambiente laboratorial, admitiu-se que a qualidade dos

materiais e dos processos construtivos são homogêneas em toda a área dos elementos estudados. Admitiu-se ainda que, devido ao formato das células de teste, o fluxo de temperatura foi sempre perpendicular ao plano da parede nos locais de medição selecionados. As diferenças de temperatura entre os lados interior e exterior da parede ensaiada foram sempre consideradas suficientes para os dados obtidos terem convergência no tempo disponível para a realização dos ensaios, tendo em conta que o método utilizado para a medição do desempenho térmico dos elementos foi a “técnica da soma” (*summation technique*). Tendo em conta que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial, considerou-se que as condições térmicas tiveram pouca variação ao longo do tempo.

No procedimento de cálculo utilizado foi tido em conta o ponto 6 da norma C1155, segundo o qual, os intervalos de medição foram de 5 minutos e os valores obtidos representam a média das grandezas físicas ao longo desses 5 minutos. Tendo em conta um fluxo de calor perpendicular ao plano da parede, a diferença de temperatura entre as faces da parede foi calculada através da fórmula presente no ponto 6.4.1 da norma.

$$\Delta T_s = T_{is} - T_{os} \quad [1]$$

Sendo ΔT_s a diferença entre as temperaturas superficiais interior (T_{is}) e exterior (T_{os}).

O passo seguinte consiste em calcular a resistência térmica do elemento. Para tal, escolheu-se o método da soma. Este método de cálculo consiste na acumulação de dados de fluxo de calor e diferenças de temperatura na superfície ao longo do tempo. A resistência térmica de um elemento é calculada através da aplicação da seguinte equação:

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta T_k}{\sum_{k=1}^M q_k} \quad [2]$$

Sendo R_e a resistência térmica do elemento, ΔT_k a diferença de temperaturas entre as faces interior e exterior dos elementos num determinado período de tempo e q_k o fluxo de calor nesse mesmo período de tempo.

Sempre que possível, a duração dos ensaios incluiu no mínimo um ciclo de 24 horas, no entanto, e uma vez que as medições foram efetuadas em ambiente laboratorial controlado, foi possível obter resultados em períodos de tempo com menor duração mas estáveis. Sendo assim, foram selecionados períodos de tempo com um mínimo de 12 horas para se obter convergência de resultados. Os períodos de tempo selecionados foram majoritariamente em período noturno, visto ser neste período que se verificam intervalos mais estáveis devido ao facto de existirem menos perturbações.

Para se efetuar o teste de convergência foi utilizada a fórmula indicada no ponto 6.5 da norma C1155, segundo o qual, o valor do fator de convergência deve manter-se abaixo de 10% durante 3 períodos consecutivos.

$$CR_n = \frac{R_e(t) - R_e(t-n)}{R_e(t)} \leq 0.1 \quad [3]$$

Sendo CR_n o fator de convergência, $R_e(t)$ a resistência térmica no período t e $R_e(t-n)$ a resistência térmica calculada no período anterior ao período t .

Em seguida, e para validação do resultado obtido, é ainda necessário efetuar o teste de variância através da seguinte equação:

$$V(R_e) = \left[\frac{s(R_e)}{\text{mean}(R_e)} \right] \times (100\%) \quad [4]$$

Sendo $V(R_e)$ a variância da amostra, $s(R_e)$ o desvio padrão e $\text{mean}(R_e)$ a média da amostra.

O teste de variância deve ser verificado em pelo menos 3 intervalos independentes onde também seja verificado o teste de convergência. Caso o valor da variância em cada um desses 3 intervalos seja inferior a 10%, a resistência térmica do elemento é calculada através da média dos valores da resistência térmica do elemento (R_e). No entanto, se a variância for superior a 10%, os resultados obtidos não permitem a obtenção de um valor de resistência térmica do elemento aceitável.

Na parede estudada, e na grande maioria dos elementos construtivos, as áreas representativas dos valores de resistência térmica dos locais dos elementos com diferentes comportamentos não eram áreas iguais. Sendo assim para calcular um valor

de resistência térmica representativo do elemento foi necessário efetuar uma média ponderada em áreas através da fórmula indicada no ponto 6.6.2 da norma:

$$R_m = \frac{\left[\sum_{j=1}^N A_j \right]}{\left[\sum_{j=1}^N A_j / R_{ej} \right]} \quad [5]$$

Sendo que R_m representa a resistência térmica média do elemento e R_{ej} representa a resistência térmica de uma zona do elemento construtivo de área A_j , em que as condições térmicas são semelhantes.

4.3 Considerações adicionais sobre os ensaios

Após a construção da parede de BTC, e antes da sua colocação na posição final na câmara de ensaio, foram instalados os sensores de temperaturas superficiais nos pontos selecionados para medição. Depois de realizada a sua instalação foram retiradas as suas cotas, de forma a ser possível na face exterior proceder à instalação dos sensores de temperaturas superficiais e dos medidores de fluxo de calor exatamente à mesma cota.

Numa primeira fase optou-se por fazer a colocação dos sensores de fluxo de calor na face interior da parede, no entanto, através dos resultados obtidos verificou-se que as medições não estabilizavam. Tal situação poderá dever-se ao facto de o ar condicionado estar ligado no interior da câmara, o que, em contato com os medidores de fluxo de calor, fazia com que houvesse uma grande variação do referido fluxo em intervalos de tempo bastante reduzidos. Assim sendo, em todas as fases de medição, a colocação dos sensores de fluxo de calor foi realizada pelo exterior, o que permitiu a estabilização das medições e a obtenção de resultados válidos.

Capítulo 5

RESULTADOS

5.1 Análise de resultados

Depois de instalados todos os equipamentos e de iniciadas as medições, procedeu-se ao armazenamento dos dados no *datalogger* CR10X e posteriormente ao seu tratamento estatístico.

Tal como já foi referido, importa salientar que, de forma a caracterizar e calibrar o método de ensaio para determinação da resistência térmica dos elementos construtivos, os ensaios foram efetuados em 3 paredes simples de constituição diferente:

- Junta seca;
- Junta barrada por betume;
- Junta barrada por betume e colocação de 2cm de isolamento (aglomerado de cortiça) na face exterior.

A adoção deste método visa a possibilidade de se averiguar a diferença entre os resultados obtidos segundo as várias constituições da parede e assim, prever também o comportamento energético dos BTC com os vários elementos construtivos.

Como já foi referido, escolherem-se 5 pontos de medição: junta vertical, junta horizontal, encontro de juntas, zona oca e zona centro do bloco. Sendo que, para as 3

medições, e uma vez retiradas as cotas de colocação dos equipamentos, estes foram colocados sempre nos mesmos locais.

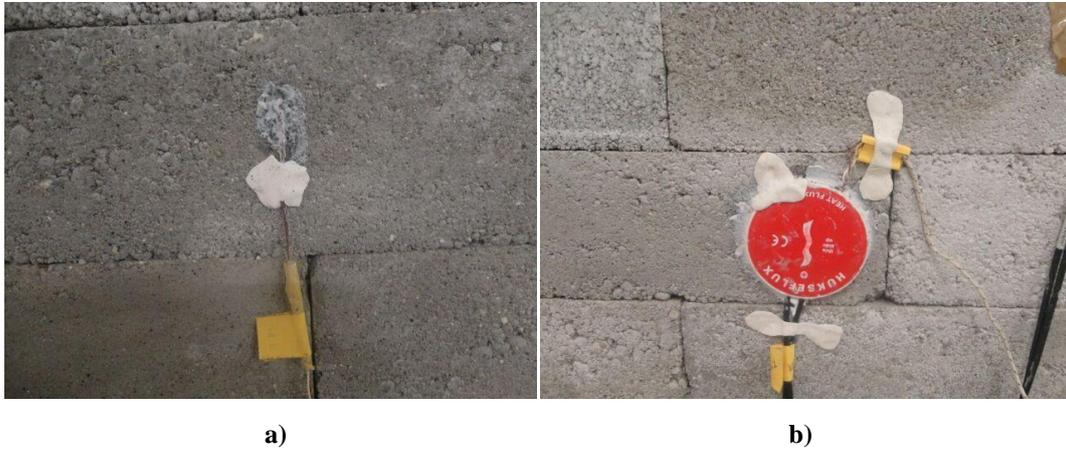


Figura 5. 1: instalação dos equipamentos: a) interior da câmara; b) exterior da câmara.

Uma vez instalados os equipamentos e armazenadas as medições efetuadas procedeu-se então ao cálculo da resistência térmica dos BTC seguindo os procedimentos de cálculo descritos na norma C1155, de 2001, publicada pela ASTM.

5.1.1 Parede junta seca

A parede de teste 1 consiste numa parede simples com junta seca. Como referido anteriormente, foram selecionados os 5 locais de medição, tendo em conta que neste elemento existiam 5 zonas com diferentes tipos de comportamento térmico: zona centro, zona perfurada, junta vertical, junta horizontal e encontro de juntas, tal como pode ser visto na Figura 5.2.



Figura 5. 2: Equipamentos instalados na parede de teste 1.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos e os gráficos relativos aos valores medidos, ao longo do tempo, para cada um dos pontos de medição.

a) Zona centro

No gráfico da Figura 5.3, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da zona centro da parede de junta seca. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

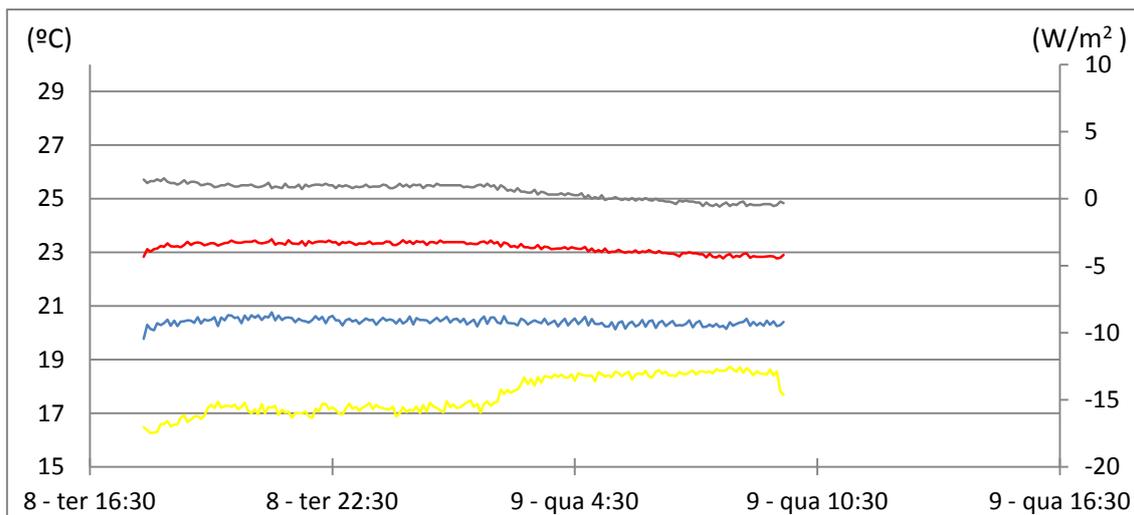


Figura 5. 3: Medições efetuadas para a zona centro do bloco.

Através do gráfico da Figura 5.3 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,19 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,45 \text{ m}^2\text{C/W}$.

b) Zona perfurada

No gráfico da Figura 5.4, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo para avaliação do comportamento térmico da zona perfurada da parede de junta seca. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda

e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo que, a linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de claro acontece do exterior para o interior da câmara.

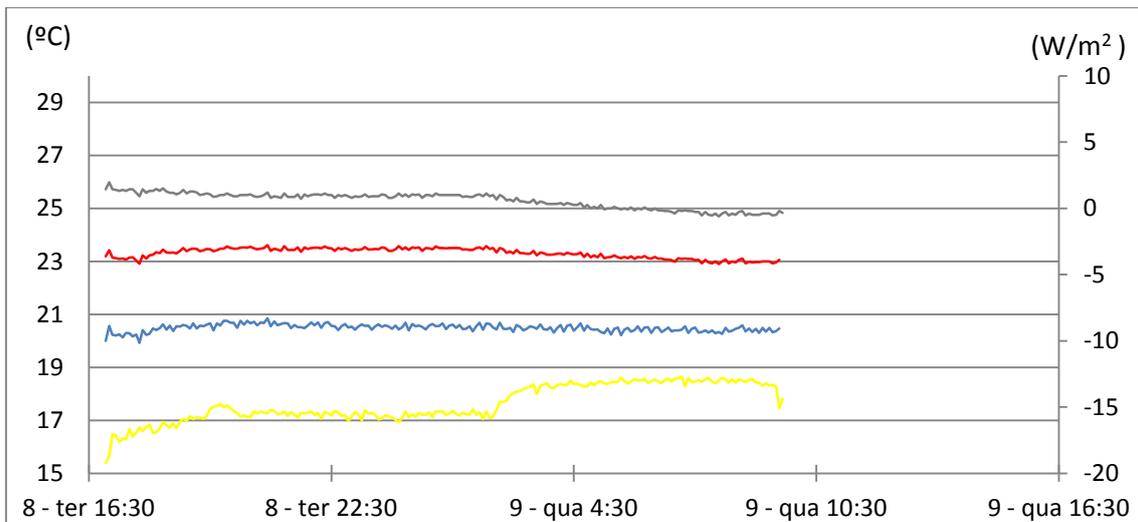


Figura 5. 4: Medições efetuadas para a zona per do bloco.

Da análise do gráfico da Figura 5.4 verifica-se que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,19 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Sendo assim, e depois

de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,45\text{m}^2\text{°C/W}$.

c) Junta Vertical

No gráfico da Figura 5.5, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo para avaliação do comportamento térmico da junta vertical da parede de junta seca. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo que, a linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

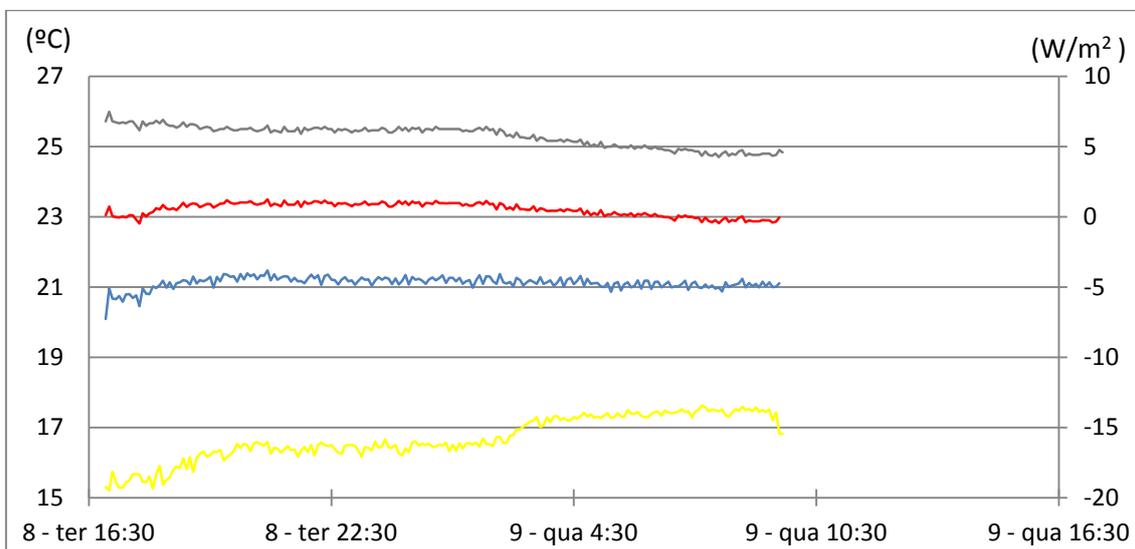


Figura 5. 5: Medições efetuadas para a junta vertical.

Através do gráfico da Figura 5.5 verifica-se que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,39 \text{ m}^2\text{C/W}$.

d) Junta horizontal

No gráfico da Figura 5.6, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo para avaliação do comportamento térmico da junta horizontal da parede de junta seca. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo que, a linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/ m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

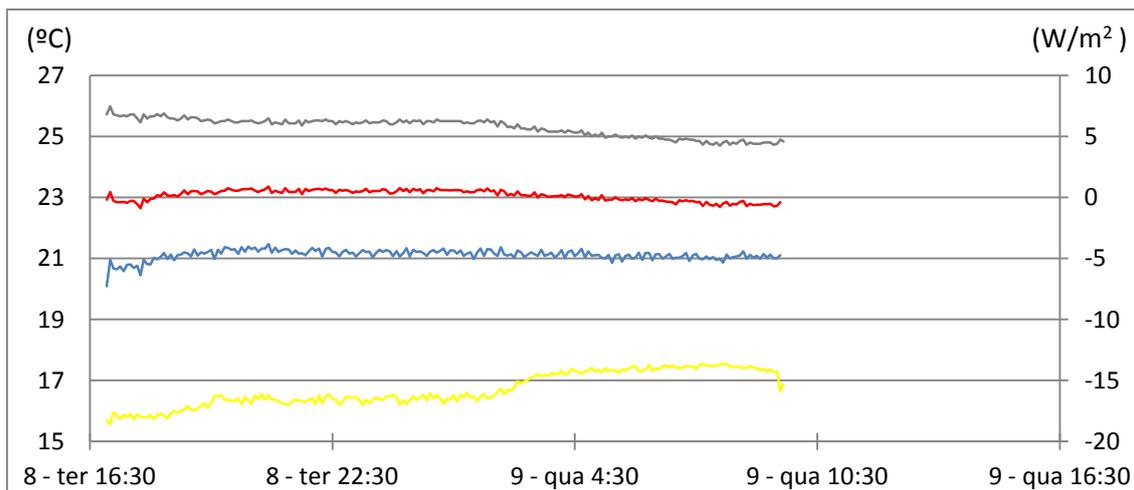


Figura 5. 6: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco.

No gráfico da Figura 5.6 verifica-se que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,12 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,38 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$.

e) Encontro de juntas

No gráfico da Figura 5.7, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo para avaliação do comportamento térmico do encontro de juntas da parede de junta seca. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo que, a linha amarela (fluxo de calor ao longo

do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de claro acontece do exterior para o interior da câmara.

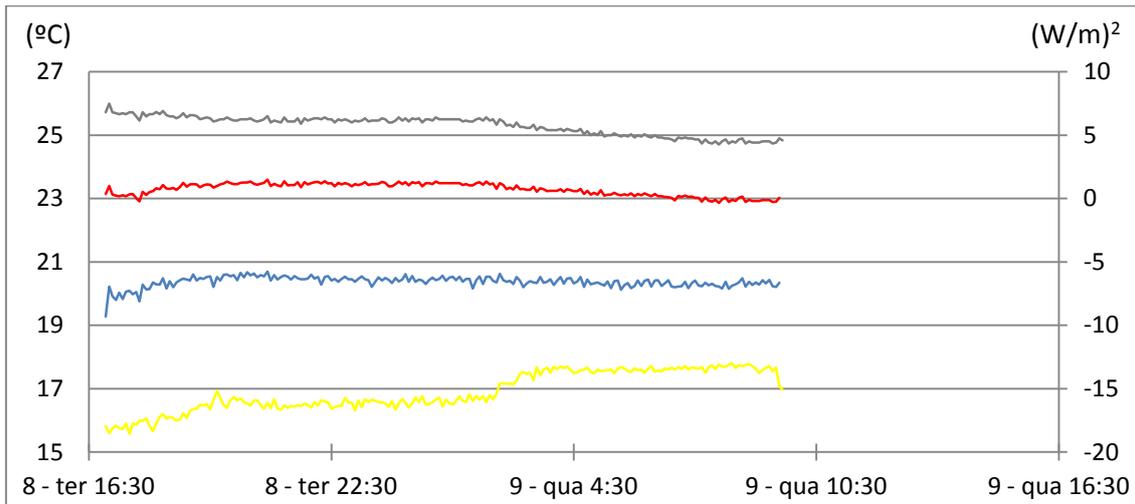


Figura 5. 7: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco.

Da análise do gráfico da Figura 5.7 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,19 m^2C/W$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 m^2C/W$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,45 m^2C/W$.

f) Resistência térmica do elemento

De acordo com o ponto 6 da norma C1155, a resistência térmica representativa do elemento deve ser calculada em função do desempenho térmico das diferentes zonas de comportamento térmico do elemento e da respectiva área de referência.

Na parede estudada, e na grande maioria dos elementos construtivos, as áreas representativas dos valores de resistência térmica dos locais dos elementos com diferentes comportamentos, não eram áreas iguais. Sendo assim, para calcular um valor de resistência térmica representativo do elemento é necessário efetuar uma média ponderada em áreas.

Tendo em consideração a área de referência representativa de cada ponto de medição, as dimensões do fluxímetro e área de medição, chegou-se a um conjunto de valores indicativo da área de referência de cada um dos locais de medição. Desta forma, foi possível o cálculo de um valor de resistência térmica representativo do elemento através da média ponderada em áreas de acordo com a fórmula [5] do ponto 6.6.2 da norma. Foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento

	R	Aeq(cm²)	Aeq(m²)	A/R
Junta horizontal	0,12	72,00	0,72	6,00
Junta vertical	0,13	21,00	0,21	1,61
Encontro de juntas	0,19	18,00	0,18	0,94
Zona perfurada	0,19	126,00	1,26	6,63
Zona centro	0,19	43,00	0,43	2,26
			R	0,16 m ² C/W

Depois de efetuados todos os cálculos e verificações para a parede simples com junta seca, chegou-se a um valor de resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. No entanto, e como referido anteriormente, este valor apenas corresponde ao bloco. Sendo ainda, necessário somar a resistência térmica superficial das duas faces da parede, como se pode verificar na Tabela 5.2.

Tabela 5. 2: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica

	R	Aeq(cm²)	Aeq(m²)	A/R
Junta horizontal	0,38	72,00	0,72	1,89
Junta vertical	0,39	21,00	0,21	0,53
Encontro de juntas	0,45	18,00	0,18	0,40
Zona perfurada	0,45	126,00	1,26	2,80
Zona centro	0,45	43,00	0,43	0,95
			R	0,42 m ² C/W

Depois de somadas todas as resistências térmicas, chegou-se a um valor final de resistência térmica do elemento de $0,42 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$.

Com o valor da resistência térmica final do elemento torna-se então possível o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U através de:

$$U = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n R_T \right]} \Leftrightarrow U = \frac{1}{0,42} \Leftrightarrow U = 2,35 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$$

Para a parede simples com junta seca o coeficiente de transmissão térmica, U é igual a $2,35 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$.

No gráfico da Figura 5.8, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo pelos fluxímetros nos vários pontos em estudo. A linha amarela é referente ao fluxímetro instalado na zona centro do bloco, a vermelha é referente ao fluxímetro

instalado na zona oca do bloco, a verde é referente ao fluxímetro instalado na junta vertical, a roxa é referente ao fluxímetro instalado na junta horizontal e a azul referente ao fluxímetro instalado na junta em T do bloco. As medições fluxo de calor ao longo do elemento medem-se em *Watts* por metro quadrado (W/ m^2).

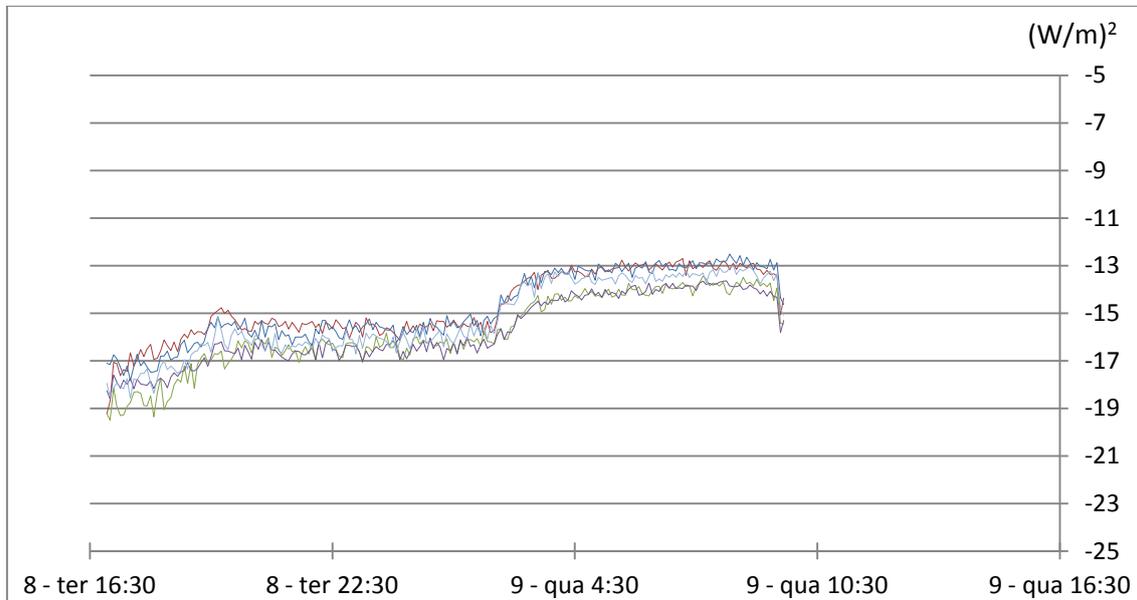


Figura 5. 8: Medições dos fluxímetros

Através da análise deste gráfico pode-se verificar que o fluxo de calor nos vários pontos selecionados dos blocos é bastante próximo, verificando-se apenas na junta vertical (verde) e na junta horizontal (roxo) um ligeiro aumento de fluxo de calor, o que seria de esperar uma vez que estamos a falar de uma parede com junta seca, sem qualquer preenchimento. Verifica-se, também, que durante o dia existe um maior fluxo de calor comparativamente com o período noturno, devido ao fato de as temperaturas durante o dia serem mais elevadas no exterior da câmara. Uma vez que os ensaios se realizaram no verão, o fluxo de calor dá-se do exterior para o interior da câmara.

5.1.2 Parede junta barrada por betume

A parede de teste 2 consiste numa parede simples com junta preenchida por betume. Os equipamentos de medição são colocados nas mesmas zonas de diferente comportamento

térmico selecionados para a parede de teste 1 e colocados exatamente no mesmo local, tal como pode ser visto na Figura 5.9.

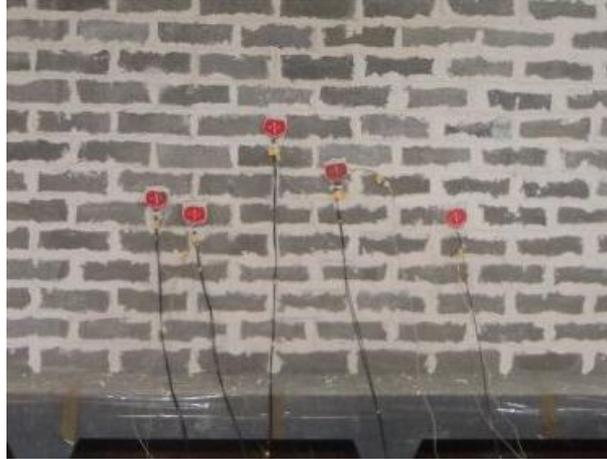


Figura 5. 9: Equipamentos instalados na parede de teste 2

De seguida, são apresentados os resultados obtidos e os gráficos relativos aos valores medidos, ao longo do tempo, para cada um dos pontos de medição.

a) Zona centro

No gráfico da Figura 5.10, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da zona centro da parede de junta barrada por betume. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula) são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

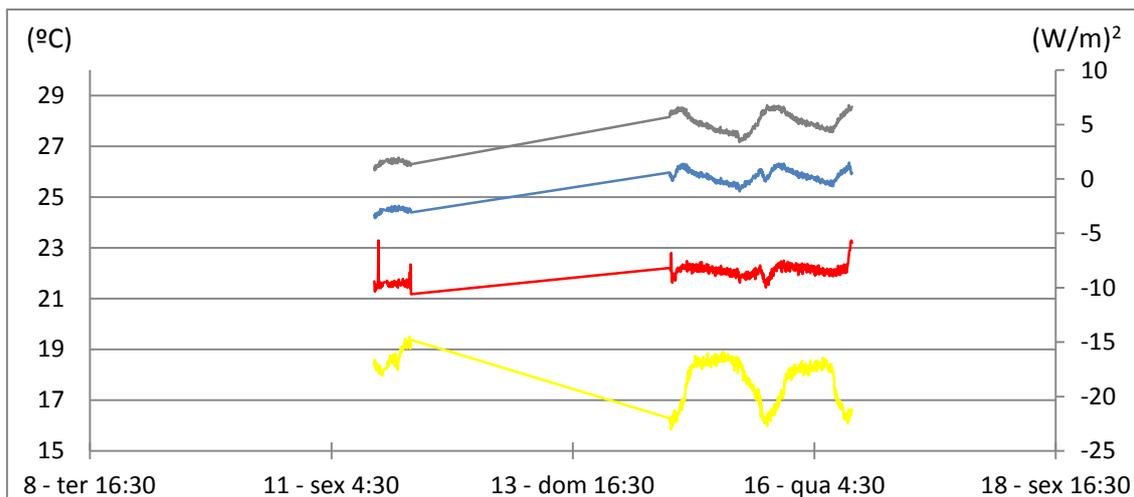


Figura 5. 10: Medições efetuadas para a zona centro do bloco

Da análise do gráfico da Figura 5.10 verificam-se algumas oscilações nas medições. Estas oscilações devem-se ao facto de o período de tempo das medições ser superior ao efetuado para a parede de teste 1, havendo por vezes perturbações na câmara de ensaio devido ao normal funcionamento do laboratório. No entanto apesar de algumas oscilações, há períodos de tempo em que as medições estabilizam, sendo esses períodos os selecionados para o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,20 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,46 \text{ m}^2\text{C/W}$.

b) Zona perfurada

No gráfico da Figura 5.11, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da zona perfurada da parede de junta barrada por betume. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula) são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

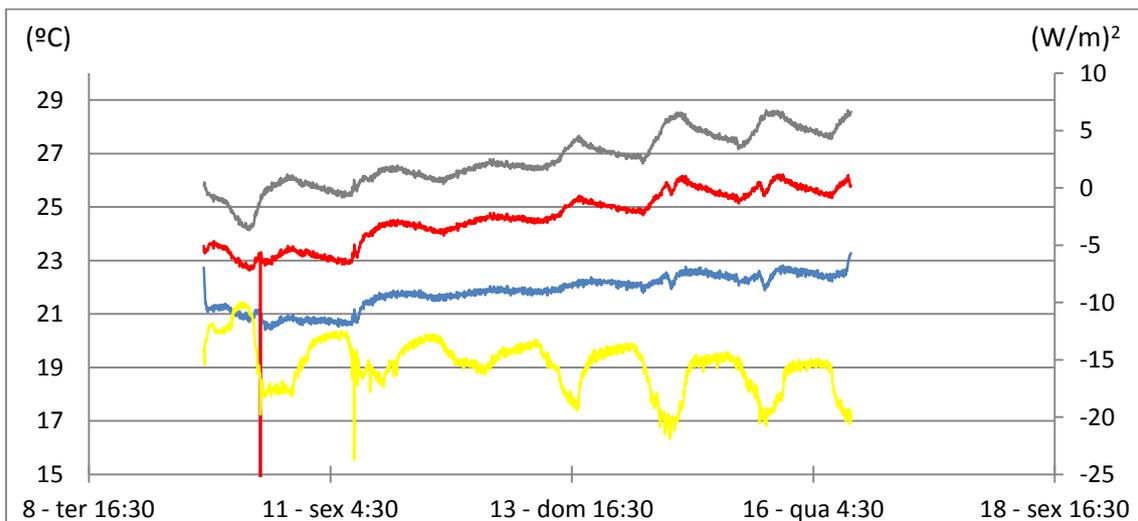


Figura 5. 11: Medições efetuadas para a zona perfurada do bloco

No gráfico da Figura 5.11 verificam-se oscilações nas medições. Na fase inicial das medições verificam-se alguns picos, que se deve ao facto de os equipamentos não estarem bem instalados. No entanto as restantes oscilações que vão ocorrendo durante a medição devem-se ao facto de o período de tempo das medições ser superior ao efetuado para a parede de teste 1, havendo por vezes perturbações na câmara de ensaio devido ao normal funcionamento do laboratório.

Apesar de algumas oscilações, há períodos de tempo em que as medições estabilizam, sendo esses períodos os selecionados para o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,18 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,44 \text{ m}^2\text{C/W}$.

c) Junta Vertical

Da análise gráfico da Figura 5.12, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da junta vertical da parede de junta barrada por betume. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula) são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/ m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

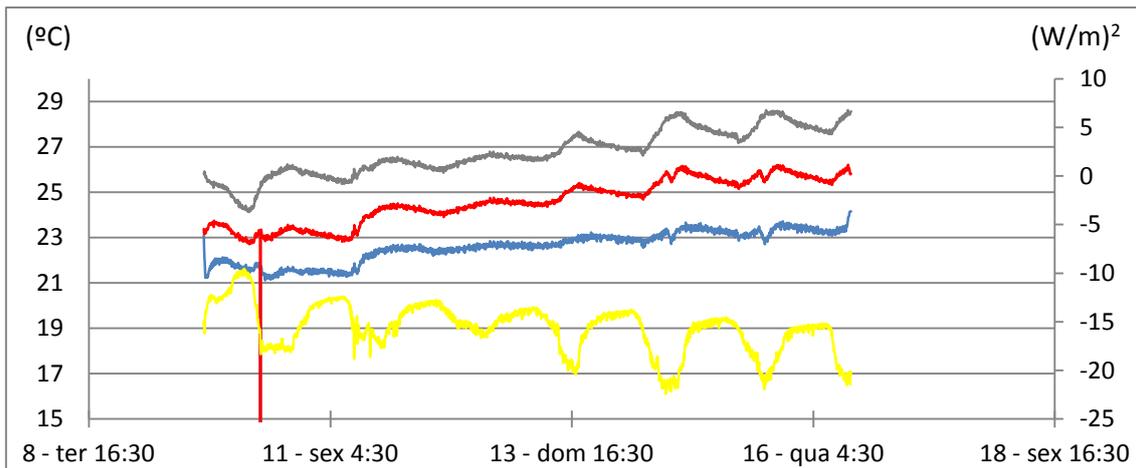


Figura 5. 12: Medições efetuadas para a junta vertical do bloco

Através da análise do gráfico da Figura 5.12 verifica-se a existência de oscilações nas medições. Na fase inicial das medições verificam-se alguns picos, que se deve ao facto de os equipamentos não estarem bem instalados. No entanto as restantes oscilações que vão ocorrendo durante a medição devem-se ao facto de o período de tempo das medições ser superior ao efetuado para a parede de teste 1, havendo por vezes perturbações na câmara de ensaio devido ao normal funcionamento do laboratório.

Apesar das oscilações existentes, há períodos de tempo em que as medições estabilizam, sendo esses períodos os selecionados para o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,39 \text{ m}^2\text{C/W}$.

d) Junta horizontal

No gráfico da Figura 5.13, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da junta horizontal da parede de junta barrada por betume. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula) são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius (°C). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

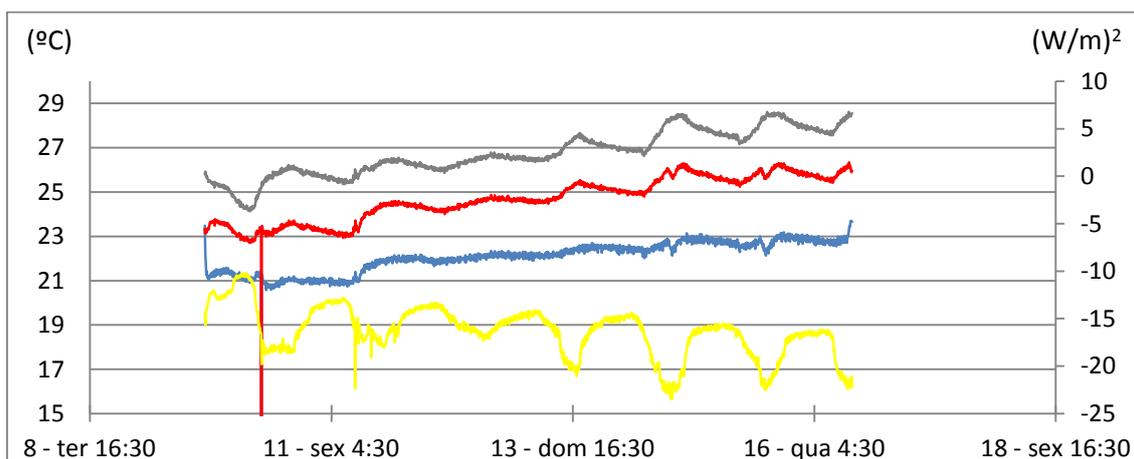


Figura 5. 13: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco

Da análise do gráfico da Figura 5.13 verifica-se a existência de oscilações nas medições. Na fase inicial das medições verificam-se alguns picos, que se deve ao facto de os equipamentos não estarem bem instalados. No entanto as restantes oscilações que vão ocorrendo durante a medição devem-se ao facto de o período de tempo das medições ser superior ao efetuado para a parede de teste 1, havendo por vezes perturbações na câmara de ensaio devido ao normal funcionamento do laboratório.

Apesar das oscilações existentes, há períodos de tempo em que as medições estabilizam, sendo esses períodos os selecionados para o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,16 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,42 \text{ m}^2\text{C/W}$.

e) Encontro de juntas

No gráfico da Figura 5.14, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico do encontro de juntas da parede de junta barrada por betume. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula) são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

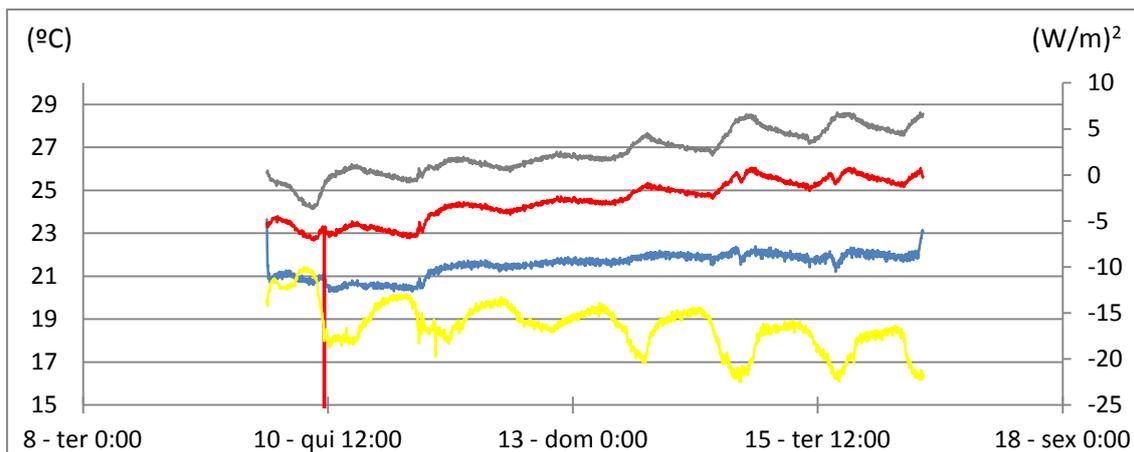


Figura 5. 14: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco

Através da análise do gráfico da Figura 5.14 verifica-se a existência de oscilações nas medições. Na fase inicial das medições verificam-se alguns picos, que se deve ao facto de os equipamentos não estarem bem instalados. No entanto as restantes oscilações que vão ocorrendo durante a medição devem-se ao facto de o período de tempo das medições ser superior ao efetuado para a parede de teste 1, havendo por vezes perturbações na câmara de ensaio devido ao normal funcionamento do laboratório.

Apesar das oscilações existentes, há períodos de tempo em que as medições estabilizam, sendo esses períodos os selecionados para o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,18 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,44 \text{ m}^2\text{C/W}$.

f) Resistência térmica do elemento

De acordo com o ponto 6 da norma C1155, a resistência térmica representativa do elemento deve ser calculada em função do desempenho térmico das diferentes zonas de comportamento térmico do elemento e da respetiva área de referência.

Na parede estudada, e na grande maioria dos elementos construtivos, as áreas representativas dos valores de resistência térmica dos locais dos elementos com diferentes comportamentos, não eram áreas iguais. Sendo assim, para calcular um valor de resistência térmica representativo do elemento é necessário efetuar uma média ponderada em áreas.

Tendo em consideração a área de referência representativa de cada ponto de medição, as dimensões do fluxímetro e área de medição, chegou-se a um conjunto de valores indicativo da área de referência de cada um dos locais de medição. Desta forma, foi possível o cálculo de um valor de resistência térmica representativo do elemento através da média ponderada em áreas de acordo com a fórmula [5] do ponto 6.6.2 da norma. Foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento

	R	Aeq(cm²)	Aeq(m²)	A/R
Junta horizontal	0,16	72,00	0,72	4,50
Junta vertical	0,13	21,00	0,21	1,61
Encontro de juntas	0,18	18,00	0,18	1,00
Zona perfurada	0,18	126,00	1,26	7,00
Zona centro	0,20	43,00	0,43	2,15
			R	0,17m ² °C/W

Depois de efetuados todos os cálculos e verificações para a parede simples com junta barrada por betume, chegou-se a um valor de resistência térmica de 0,17 m²°C/W.

No entanto, e como referido anteriormente, este valor apenas corresponde ao bloco. Sendo ainda, necessário somar a resistência térmica superficial das duas faces da parede, como se pode verificar na Tabela 5.4.

Tabela 5. 4: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica

	R	Aeq(cm ²)	Aeq(m ²)	A/R
Junta horizontal	0,42	72,00	0,72	1,71
Junta vertical	0,39	21,00	0,21	0,53
Encontro de juntas	0,44	18,00	0,18	0,40
Zona perfurada	0,44	126,00	1,26	2,86
Zona centro	0,46	43,00	0,43	0,93
			R	0,43m ² °C/W

Depois de somadas todas as resistências térmicas, chegou-se a um valor final de resistência térmica do elemento de 0,43 m²°C/W.

Com o valor da resistência térmica final do elemento torna-se então possível o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U através de:

$$U = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n R_T \right]} \Leftrightarrow U = \frac{1}{0,43} \Leftrightarrow U = 2,31 \text{ W/ m}^2\text{°C}$$

Para a parede simples com junta barrada por betume o coeficiente de transmissão térmica, U é igual a 2,31 W/ m²°C.

No gráfico da Figura 5.15, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo pelos fluxímetros nos vários pontos em estudo. A linha amarela é referente ao fluxímetro instalado na zona centro do bloco, a vermelha é referente ao fluxímetro

instalado na zona oca do bloco, a verde é referente ao fluxímetro instalado na junta vertical, a roxa é referente ao fluxímetro instalado na junta horizontal e a azul referente ao fluxímetro instalado na junta em T do bloco. As medições fluxo de calor ao longo do elemento medem-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

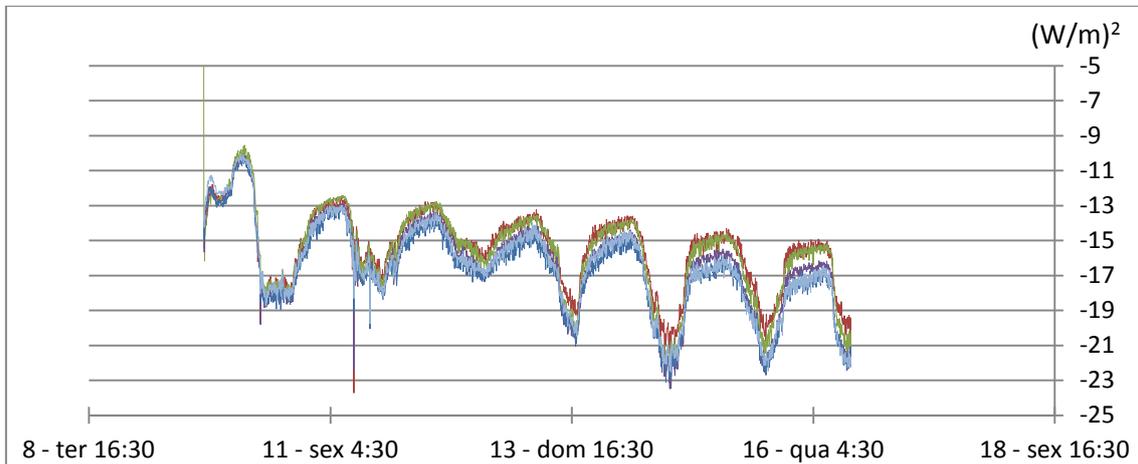


Figura 5. 15: Medições dos fluxímetros

Através da análise deste gráfico pode-se verificar que o fluxo de calor nos vários pontos selecionados dos blocos é bastante próximo, verificando-se neste caso na junta vertical (verde) e na zona oca do bloco (vermelho) uma ligeira diminuição de fluxo de calor, o que seria de esperar nas juntas uma vez que as mesmas foram preenchidas por betume. Verifica-se, também, que durante os dias de medição há alguma oscilação na medição do fluxo de calor que derivam das diferentes temperaturas que são sentidas no exterior da câmara, as temperaturas no período noturno baixam quando comparadas com o período diurno de medições. Uma vez que os ensaios se realizaram no verão, o fluxo de calor dá-se do exterior para o interior da câmara.

5.1.3 Parede junta barrada por betume e 2 cm de isolamento térmico (aglomerado de cortiça)

A parede de teste 3 consiste numa parede simples com junta barrada por betume e 2 cm de isolamento térmico (aglomerado de cortiça) na face exterior da parede. Os equipamentos de medição são colocados nas mesmas zonas de diferente comportamento

térmico selecionados para a parede de teste 1 e 2 e colocados exatamente no mesmo local, tal como pode ser visto na Figura 5.16.



Figura 5. 16: Equipamentos instalados na parede de teste 3

De seguida, são apresentados os resultados obtidos e os gráficos relativos aos valores medidos, ao longo do tempo, para cada um dos pontos de medição.

a) Zona centro

No gráfico da Figura 5.17, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da zona centro da parede de junta barrada por betume e 2cm de aglomerado de cortiça. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

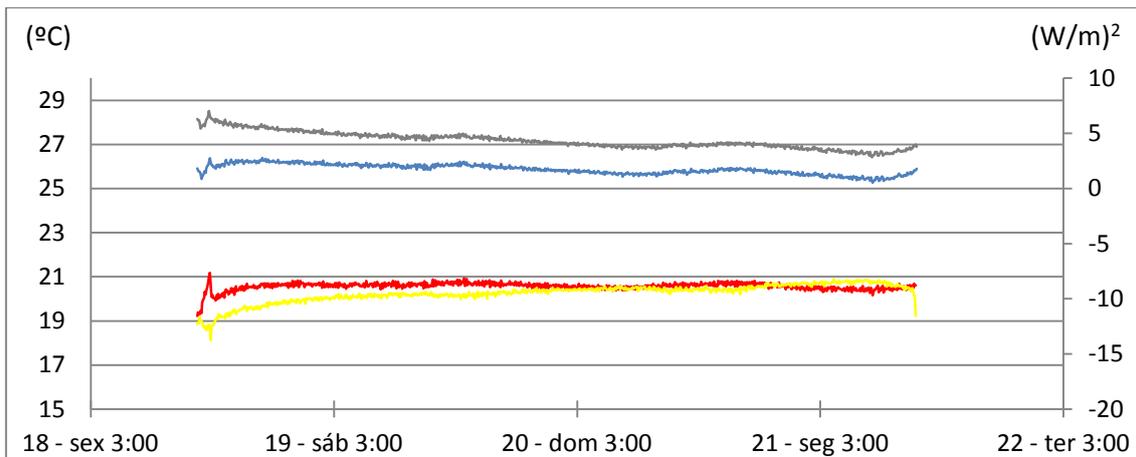


Figura 5. 17: Medições efetuadas para a zona centro do bloco

No gráfico da Figura 5.17 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,56 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,82 \text{ m}^2\text{C/W}$.

b) Zona perfurada

No gráfico da Figura 5.18, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da zona perfurada da parede de junta barrada por betume e 2cm de aglomerado de cortiça. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula),

são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

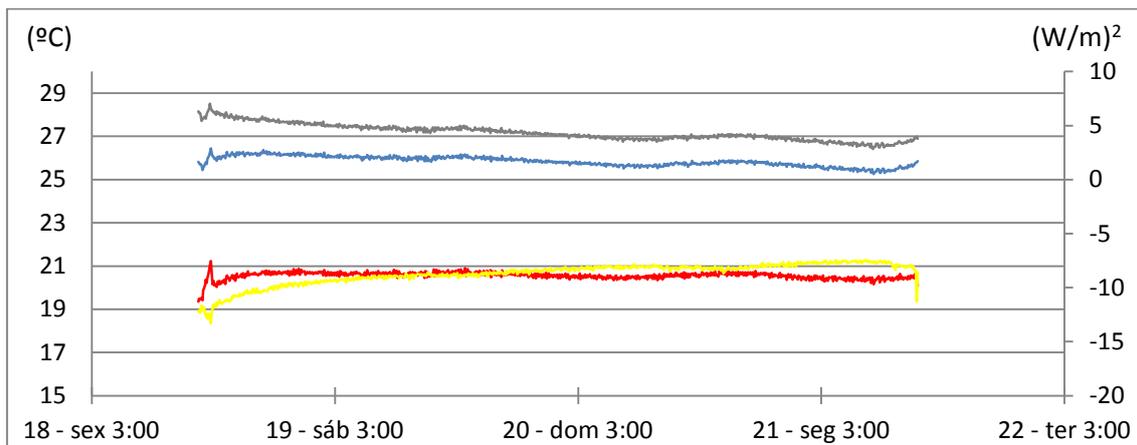


Figura 5. 18: Medições efetuadas para a zona perfurada do bloco

No gráfico da Figura 5.18 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,62 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,88 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$.

c) Junta vertical

No gráfico da Figura 5.19, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da junta vertical da parede de junta barrada por betume e 2cm de aglomerado de cortiça. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

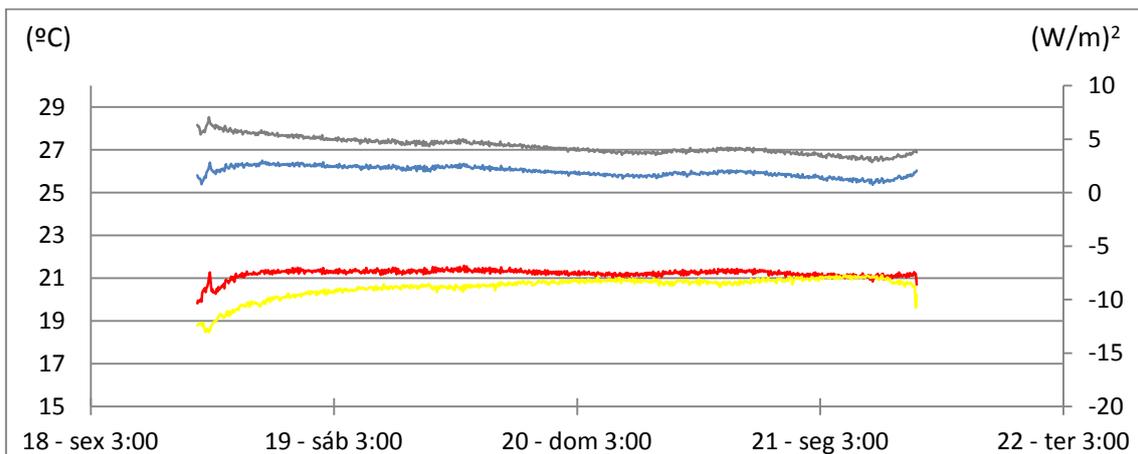


Figura 5. 19: Medições efetuadas para a junta vertical do bloco

No gráfico da Figura 5.19 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,55 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da

parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,81 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$.

d) Junta horizontal

No gráfico da Figura 5.20, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico da junta horizontal da parede de junta barrada por betume e 2cm de aglomerado de cortiça. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

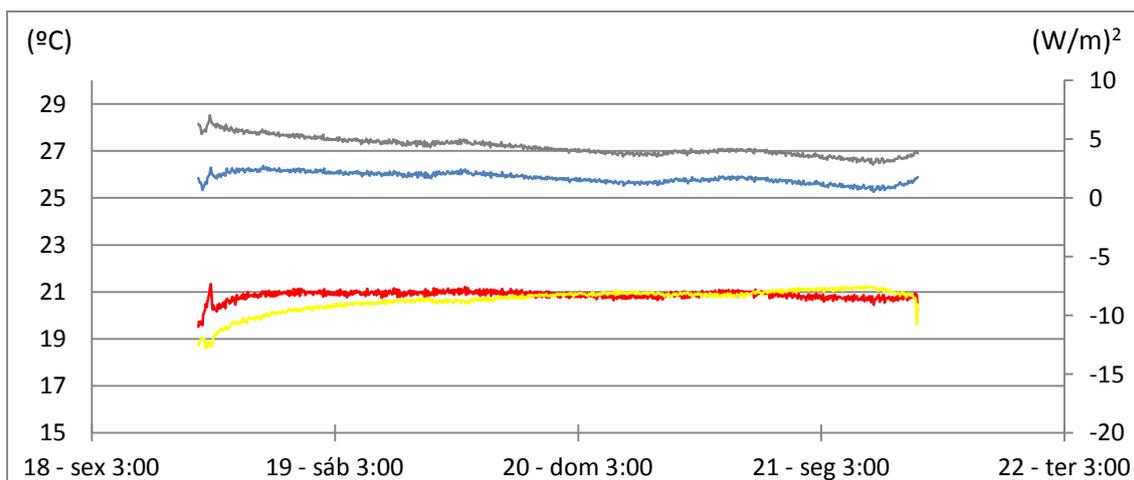


Figura 5. 20: Medições efetuadas para a junta horizontal do bloco

No gráfico da Figura 5.20 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,59 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,85 \text{ m}^2\text{C/W}$.

e) Encontro de juntas

No gráfico da Figura 5.21, apresenta-se o conjunto de medições realizadas, ao longo do tempo, para avaliação do comportamento térmico do encontro de juntas da parede de junta barrada por betume e 2cm de aglomerado de cortiça. As linhas, vermelha (termopar exterior), azul (termopar interior) e cinza (temperatura ambiente no exterior da célula), são referentes ao eixo vertical da esquerda e medem-se em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). A linha amarela (fluxo de calor ao longo do elemento) refere-se ao eixo vertical direito e mede-se em *Watts* por metro quadrado (W/ m^2).

Em relação ao eixo vertical direito, relativo fluxo de calor ao longo do elemento, este apresenta valores negativos, uma vez que o fluxo de calor acontece do exterior para o interior da câmara.

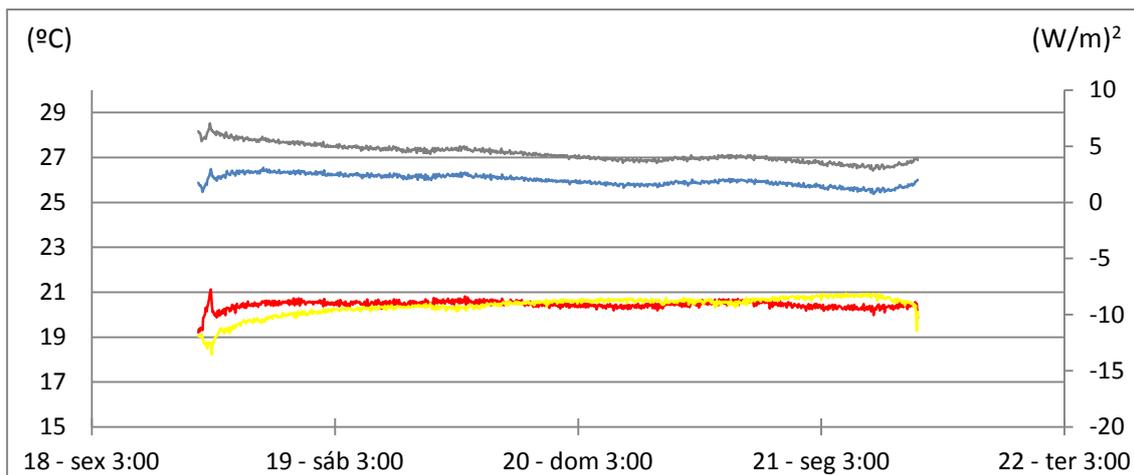


Figura 5. 21: Medições efetuadas para o encontro de juntas do bloco

Através do gráfico da Figura 5.21 é possível verificar que as medições estão estabilizadas, não havendo grande oscilação nas mesmas ao longo do tempo. Pode assim iniciar-se o procedimento de cálculo para obtenção da resistência térmica do elemento (BTC).

De acordo com os períodos de medição onde foi possível obter convergência de valores, o valor da resistência térmica obtido para esta seção foi de $0,60 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto este valor apenas corresponde ao bloco, sendo ainda necessário somar a esta a resistência térmica superficial junto às faces da parede. Uma vez que os ensaios foram efetuados em ambiente laboratorial considera-se um ambiente interior nas duas faces da parede, sendo o valor da resistência térmica superficial interior e exterior iguais ($R_{se}=R_{si}$), e através do Quadro I.3 do ITE50, com sentido de fluxo horizontal, a resistência térmica superficial tem um valor igual a $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Sendo assim, e depois de somadas todas as resistências térmicas, chegamos a um valor de resistência térmica do elemento de $0,86 \text{ m}^2\text{C/W}$.

f) Resistência térmica do elemento

De acordo com o ponto 6 da norma C1155, a resistência térmica representativa do elemento deve ser calculada em função do desempenho térmico das diferentes zonas de comportamento térmico do elemento e da respectiva área de referência.

Na parede estudada, e na grande maioria dos elementos construtivos, as áreas representativas dos valores de resistência térmica dos locais dos elementos com diferentes comportamentos, não eram áreas iguais. Sendo assim, para calcular um valor de resistência térmica representativo do elemento é necessário efetuar uma média ponderada em áreas.

Tendo em consideração a área de referência representativa de cada ponto de medição, as dimensões do fluxímetro e área de medição, chegou-se a um conjunto de valores indicativo da área de referência de cada um dos locais de medição. Desta forma, foi possível o cálculo de um valor de resistência térmica representativo do elemento através da média ponderada em áreas de acordo com a fórmula [5] do ponto 6.6.2 da norma. Foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5. 5: Áreas e coeficiente de resistência térmica do elemento

	R	Aeq(cm²)	Aeq(m²)	A/R
Junta horizontal	0,59	72,00	0,72	1,22
Junta vertical	0,55	21,00	0,21	0,38
Encontro de juntas	0,60	18,00	0,18	0,30
Zona perfurada	0,62	126,00	1,26	2,03
Zona centro	0,56	43,00	0,43	0,77
			R	0,60 m ² °C/W

Depois de efetuados todos os cálculos e verificações para a parede simples com junta barrada por betume, chegou-se a um valor de resistência térmica de 0,60 m²°C/W.

No entanto, e como referido anteriormente, este valor apenas corresponde ao bloco. Sendo ainda, necessário somar a resistência térmica superficial das duas faces da parede, como se pode verificar na Tabela 5.6.

Tabela 5. 6: Soma das resistências térmicas superficiais e valor final da resistência térmica

	R	Aeq(cm ²)	Aeq(m ²)	A/R
Junta horizontal	0,85	72,00	0,72	0,85
Junta vertical	0,81	21,00	0,21	0,26
Encontro de juntas	0,86	18,00	0,18	0,21
Zona perfurada	0,88	126,00	1,26	1,43
Zona centro	0,82	43,00	0,43	0,52
			R	0,86m ² °C/W

Depois de somadas todas as resistências térmicas, chegou-se a um valor final de resistência térmica do elemento de 0,86 m²°C/W.

Com o valor da resistência térmica final do elemento torna-se então possível o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U através de:

$$U = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n R_T \right]} \Leftrightarrow U = \frac{1}{0,86} \Leftrightarrow U = 1,16 \text{ W/ m}^2\text{°C}$$

Para a parede simples com junta barrada por betume o coeficiente de transmissão térmica, U é igual a 1,16 W/ m²°C.

No gráfico da Figura 5.22, apresenta-se o conjunto de medições realizadas ao longo do tempo pelos fluxímetros nos vários pontos em estudo. A linha, azul escuro é referente ao fluxímetro instalado na zona centro do bloco, a vermelha é referente ao fluxímetro instalado na zona perfurada do bloco, a verde é referente ao fluxímetro instalado na junta vertical, a roxa é referente ao fluxímetro instalado na junta horizontal e a azul claro referente ao fluxímetro instalado no encontro de juntas do bloco. As medições fluxo de calor ao longo do elemento medem-se em *Watts* por metro quadrado (W/ m²).

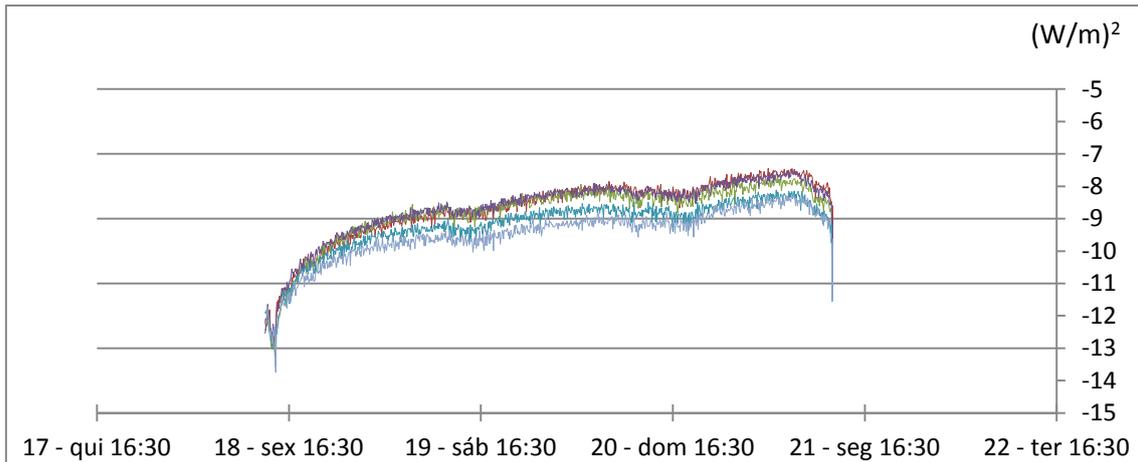


Figura 5. 22: Medições dos fluxímetros

Através da análise deste gráfico pode-se verificar que o fluxo de calor nos vários pontos seleccionados dos blocos é bastante próximo, verificando-se neste caso no encontro de juntas (azul claro) e na zona centro do bloco (azul escuro) um ligeiro aumento de fluxo de calor. Durante os dias de medição não existe grande oscilação nas medições quando comparado o período noturno com o período diurno. Uma vez que os ensaios se realizaram no verão, o fluxo de calor dá-se do exterior para o interior da câmara.

5.2 Comparação de resultados

Realizados os ensaios e apresentados os resultados para as 3 composições de parede, procede-se agora a uma comparação dos resultados obtidos com resistências térmicas de materiais correntemente utilizados na construção e com soluções construtivas convencionais, de forma a mostrar a adequabilidade da técnica construtiva em BTC realizados com SRG da região Minho, assim como, todo o seu potencial.

Para fazer essa comparação recorre-se à publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) ITE50, destinada a apoiar a realização de estudos no âmbito do desempenho térmico dos edifícios. são seleccionadas e definidas algumas constituições de paredes mais correntemente utilizadas, sendo que, apenas se utiliza 2cm de isolamento, visto ter sido a espessura utilizada na realização dos ensaios com o aglomerado de cortiça.

5.2.1 Comparação da resistência térmica dos BTC

Como referido anteriormente, a primeira medição foi efetuada numa parede simples em alvenaria de BTC com SRG da região Minho com junta seca.

Através do quadro I.5, do ITE50, que aqui se apresenta na Figura 5.23, são apresentadas as resistências térmicas para paredes simples de alvenaria. Através da análise deste quadro é possível efetuar a comparação dos resultados obtidos com tijolos cerâmicos e blocos de betão.

Tipo de elemento		Espessura da alvenaria [m]								
		0,03	0,04	0,07	0,09	0,10 0,11	0,15	0,19 0,20 0,22	0,24 0,25	0,30
tijolos cerâmicos	furado (normal)	0,07	0,10	0,19	0,23	0,27	0,39	0,52	0,56	—
	maciço	—	—	0,08	—	0,13	—	—	—	—
blocos de betão	normal	—	—	—	—	0,16	0,20	0,30	0,33	0,37
	leve	—	—	—	—	0,27	0,31	0,49	0,54	0,59

Figura 5. 23: Resistências térmicas de paredes de alvenaria simples. (Fonte: ITE50).

Segundo o ITE50 as resistências térmicas indicadas no quadro I.5 correspondem a panos simples de alvenaria simples, sem quaisquer revestimentos, e não incluem resistências térmicas superficiais (exterior e interior). Assim sendo, o valor de resistência térmica da parede com junta seca é $0,16 \text{ m}^2\text{C/W}$.

Comparando o resultado dos BTC com SRG e 0,14m de espessura com os tijolos cerâmicos furados, verifica-se que o valor de $0,16 \text{ m}^2\text{C/W}$ obtido para o bloco de terra é relativamente inferior ao do tijolo cerâmico furado. No entanto, quando se compara o valor do bloco de terra com o tijolo cerâmico maciço pode-se verificar que o valor está bastante próximo do valor da resistência térmica do tijolo cerâmico maciço. Relativamente aos blocos de betão normal é possível verificar que o valor obtido para o bloco de terra se encontra bastante próximo deste, sendo relativamente inferior ao valor de resistência térmica dos blocos de betão leve, como se pode verificar no gráfico da Figura 5.24.

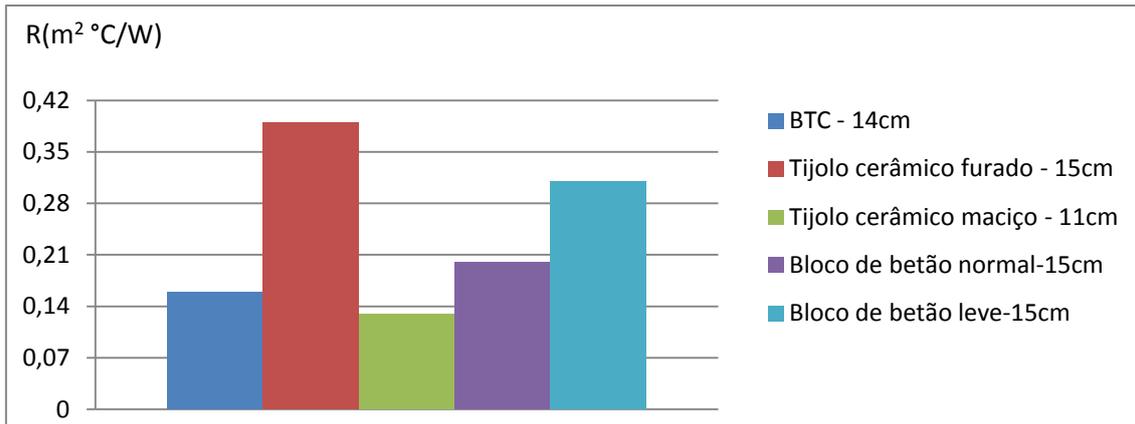


Figura 5. 24: Comparação de resistências térmicas de materiais.

No entanto esta comparação não é linear, dado que os aligeiramentos e as espessuras dos blocos e tijolos são diferentes das dos BTC. Sendo que os aligeiramentos e as espessuras têm uma influência significativa nos valores da resistência térmica.

5.2.2 Comparação com soluções de paredes convencionais

Na terceira fase de medições definiu-se uma parede simples em BTC com junta barrada por betume e com 2cm de aglomerado de cortiça. Para comparação dos resultados obtidos nesta fase de medições, selecionaram-se soluções de paredes correntemente utilizadas no mercado, considerando em todas elas apenas 2cm de isolamento térmico, visto ter sido a espessura utilizada aquando da realização dos ensaios térmicos na parede de BTC.

De salientar que a parede que em BTC foi avaliada em laboratório tendo sido considerada que a resistência do ar interior era igual à resistência do ar exterior ($R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$), assim sendo para as paredes convencionais também foi admitido que a resistência do ar interior era igual à resistência do ar exterior ($R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$).

Para as paredes convencionais foram definidas e calculadas as propriedades térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas.

Como já foi referido anteriormente para a parede simples com junta preenchida por betume e 2cm de isolamento (aglomerado de cortiça), obteve-se um valor final de

resistência térmica do elemento de $0,86 \text{ m}^2\text{C/W}$, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a $1,16 \text{ W/ m}^2\text{C}$.

Seguidamente compara-se a solução de parede em BTC, analisada em ambiente laboratorial, com as soluções de paredes convencionais selecionadas.

- **Sistema ETICS – Bloco de betão**

Esta parede é constituída por blocos de betão com 20cm de espessura, isolamento térmico EPS com 2cm de espessura e 1,5cm de reboco. Definidos os constituintes da solução de parede procedeu-se à definição das suas características térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas dos materiais.

Tabela 5. 7: Características térmicas da parede 1

1.Sistema ETICS - Bloco de betão					
Constituição	Referência	Espessura (m)	λ (W/m ⁰ C)	U (W/m ² 0C)	R (m ² .C/W)
Reboco	ITE50 - Quadro I.2	0,015	1,300		0,0115
EPS	ITE50 - Quadro I.1	0,020	0,055		0,3636
Bloco de betão	ITE50 - Quadro I.5	0,200			0,3000
R _{se}	0,13				
R _{si}	0,13				
R térmica total	0,94				
U (W/m ² .0C)	1,07				

Após a definição das propriedades térmicas obteve-se um valor final de resistência térmica do total de $0,94 \text{ m}^2\text{C/W}$, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a $1,07 \text{ W/ m}^2\text{C}$.

Comparativamente com a solução em BTC analisada em laboratório verifica-se que o valor da resistência térmica total de $0,94 \text{ m}^2\text{C/W}$ é bastante próximo do valor da solução de parede em BTC ($0,86 \text{ m}^2\text{C/W}$), assim como o valor do seu coeficiente de

transmissão térmica, U igual a 1,07 W/ m²°C está bastante próximo do valor da parede de BTC (1,16 W/ m²°C). De salientar, que no caso da parede convencional foi utilizado um reboco tradicional que melhora as características térmicas da solução, sendo que na parede de BTC testada em laboratório apenas se utilizou betume nas juntas, e através da comparação da resistência térmica total com junta seca (0,42 m²°C/W) com resistência térmica total com junta barrada por betume (0,43 m²°C/W), verifica-se que este contribui muito pouco para o melhoramento das características térmicas da solução.

Sendo assim pode dizer-se que a solução de parede em BTC com SRG do Minho está a um nível bastante próximo das paredes convencionais de blocos de betão.

- **Sistema ETICS – Bloco térmico**

Esta parede é constituída por blocos térmicos com 20cm de espessura, isolamento térmico EPS com 2cm de espessura e 1,5cm de reboco. Definidos os constituintes da solução de parede procedeu-se à definição das suas características térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas dos materiais.

Tabela 5. 8: Características térmicas da parede 2

2.Sistema ETICS - Bloco térmico					
Constituição	Referência	Espessura (m)	λ (W/m ⁰ C)	U (W/m ² °C)	R (m ² .C/W)
Reboco	ITE50 - Quadro I.2	0,015	1,300		0,0115
EPS	ITE50 - Quadro I.1	0,020	0,040		0,5000
Bloco térmico	Ficha Técnica	0,200	0,230	1,15	0,8696
R _{se}	0,13				
R _{si}	0,13				
R térmica total	1,64				
U (W/m².°C)	0,61				

Após a definição das propriedades térmicas obteve-se um valor final de resistência térmica do total de $1,64 \text{ m}^2\text{C/W}$, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a $0,61 \text{ W/ m}^2\text{C}$.

Comparativamente com a solução em BTC analisada em laboratório verifica-se que o valor da resistência térmica total de $1,64 \text{ m}^2\text{C/W}$ é relativamente superior ao valor da solução em BTC ($0,86 \text{ m}^2\text{C/W}$), assim como o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U igual a $0,61 \text{ W/m}^2\text{C}$ é relativamente inferior ao valor da solução de parede em BTC ($1,16 \text{ W/m}^2\text{C}$).

Esta diferença de resultados era expectável, uma vez que na solução convencional foi utilizado blocos térmicos, que é um bloco de argila expandida para isolamento térmico e acústico, constituído por 11 paredes longitudinais separadas entre si por dezenas de micros caixas-de-ar que permitem obter reduzidos coeficientes de transmissão térmica. Salientando também o fato de na solução convencional definida também se utilizar um reboco tradicional, o que melhora as suas propriedades térmicas, ao passo que na solução testada em laboratório só se utilizou betume para barramento das juntas e que se verificou que pouco ou nada alterava as propriedades térmicas da solução.

- **Sistema ETICS – Tijolo**

Esta parede é constituída por tijolos com 15cm de espessura, isolamento térmico EPS com 2cm de espessura e 1,5cm de reboco. Definidos os constituintes da solução de parede procedeu-se à definição das suas características térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas dos materiais.

Tabela 5. 9: Características térmicas da parede 3

3.Sistema ETICS - Tijolo					
Constituição	Referência	Espessura (m)	λ (W/m ⁰ C)	U (W/m ²⁰ C)	R _i (m ² .C/W)
Reboco exterior	ITE50 - Quadro I.2	0,015	1,300		0,0115
EPS	ITE50 - Quadro I.1	0,020	0,055		0,3636
Tijolo	ITE50 - Quadro I.5	0,15	0,385		0,3900
R _{se}	0,13				
R _{si}	0,13				
R térmica total	1,03				
U (W/m ² . ⁰ C)	0,98				

Após a definição das propriedades térmicas obteve-se um valor final de resistência térmica do total de 1,03 m²°C/W, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a 0,98 W/m²°C.

Comparativamente com a solução em BTC analisada em laboratório verifica-se que o valor da resistência térmica total de 1,03 m²°C/W é relativamente superior ao valor da solução em BTC (0,86 m²°C/W), assim como o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U igual a 0,98 W/ m²°C é relativamente inferior ao valor da parede de BTC (1,16 W/ m²°C).

Após a análise dos resultados obtidos para as características térmicas das duas soluções (parede em BTC e parede em alvenaria de tijolo), verifica-se que a parede de tijolo acaba por ter um comportamento térmico ligeiramente superior quando comparada à solução de parede em BTC testada em laboratório, no entanto essa ligeira diferença está também relacionada com utilização do reboco tradicional na solução convencional que acabava por interferir nas características térmicas da solução, ao passo que na solução em BTC o uso do betume interferiu muito pouco nas características térmicas da solução. Assim sendo pode dizer-se que a solução de parede em BTC tem um comportamento termoenergético bastante próximo ao da solução de parede em alvenaria de tijolo.

- **Parede dupla – Tijolo**

Esta parede é constituída por tijolos com 11cm de espessura, isolamento térmico XPS com 2cm de espessura, caixa-de-ar com 3cm de espessura, tijolos com 15 cm de espessura e 1,5cm de reboco. Definidos os constituintes da solução de parede procedeu-se à definição das suas características térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas dos materiais.

Tabela 5. 10: Características térmicas da parede 4

4.Parede dupla - Tijolo					
Constituição	Referência	Espessura (m)	λ (W/m ⁰ C)	U (W/m ² °C)	R (m ² .C/W)
Reboco	ITE50 - Quadro I.2	0,015	1,300		0,0115
Tijolo	ITE50 - Quadro I.5	0,15	0,385		0,3900
Caixa-de-ar	ITE50-Quadro I.4	0,03			
XPS	ITE50 - Quadro I.1	0,02	0,037		0,5405
Tijolo	Ficha Técnica	0,11	0,127	1,15	0,8696
R _{se}			0,13		
R _{si}			0,13		
R térmica total			2,07		
U (W/m ² .°C)			0,48		

Após a definição das propriedades térmicas obteve-se um valor final de resistência térmica do total de 2,07 m²°C/W, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a 0,48 W/ m²°C.

Comparativamente com a solução em BTC analisada em laboratório verifica-se que o valor da resistência térmica total de 2,07 m²°C/W é bastante superior ao valor da solução em BTC (0,86 m²°C/W), assim como o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U igual a 0,48 W/ m²°C é bastante inferior ao valor da parede de BTC (1,16 W/m²°C).

Esta diferença bastante elevada nos resultados deve-se ao fato de estarmos a comparar uma parede simples (BTC) com uma parede dupla. Para a base de comparação ser justa o mais correto seria comparar a parede BTC com paredes simples. No entanto através dos resultados obtidos podemos retirar algumas conclusões. Assim sendo, se para a parede dupla os valores obtidos são aproximadamente metade dos valores que obtidos para a parede em BTC testada em laboratório, significa que a parede em BTC tem um comportamento termoenergético bastante próximo ao das paredes constituídas por alvenaria de tijolo.

- **Sistema ETICS – Betão armado**

Esta parede é constituída por uma parede de betão armado com 20cm de espessura, isolamento térmico EPS com 2cm de espessura e 1,5cm de reboco. Definidos os constituintes da solução de parede procedeu-se à definição das suas características térmicas com base no ITE50 e em fichas técnicas dos materiais.

Tabela 5. 11: Características térmicas da parede 5

5.Sistema ETICS - Parede betão armado					
Constituição	Referência	Espessura (m)	λ (W/m ⁰ C)	U (W/m ²⁰ C)	R (m ² .C/W)
Reboco	ITE50 - Quadro I.2	0,015	1,300		0,0115
EPS	ITE50 - Quadro I.1	0,020	0,040		0,5000
Parede betão armado	ITE50 - Quadro I.2	0,200	2,500		0,0800
R _{se}				0,13	
R _{si}				0,13	
R térmica total				0,85	
U (W/m ² . ⁰ C)				1,17	

Após a definição das propriedades térmicas obteve-se um valor final de resistência térmica do total de 0,85 m²⁰C/W, e um coeficiente de transmissão térmica, U igual a 1,17 W/ m²⁰C.

Comparativamente com a solução em BTC analisada em laboratório verifica-se que o valor da resistência térmica total de $0,85 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ é praticamente igual do valor da solução de parede em BTC ($0,86 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$), assim como o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U igual a $1,17 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ praticamente igual ao valor da parede de BTC ($1,16 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$).

No entanto salienta-se novamente o fato de na parede convencional utilizada para comparação de resultados se utilizar reboco tradicional. Sendo assim fica comprovado que a parede em BTC com SRG do Minho acabava por ter um comportamento termoenergético relativamente superior ao da parede de betão armado.

No gráfico da Figura 5.25 são demonstradas as conclusões retiradas anteriormente relativamente à comparação das resistências térmicas.

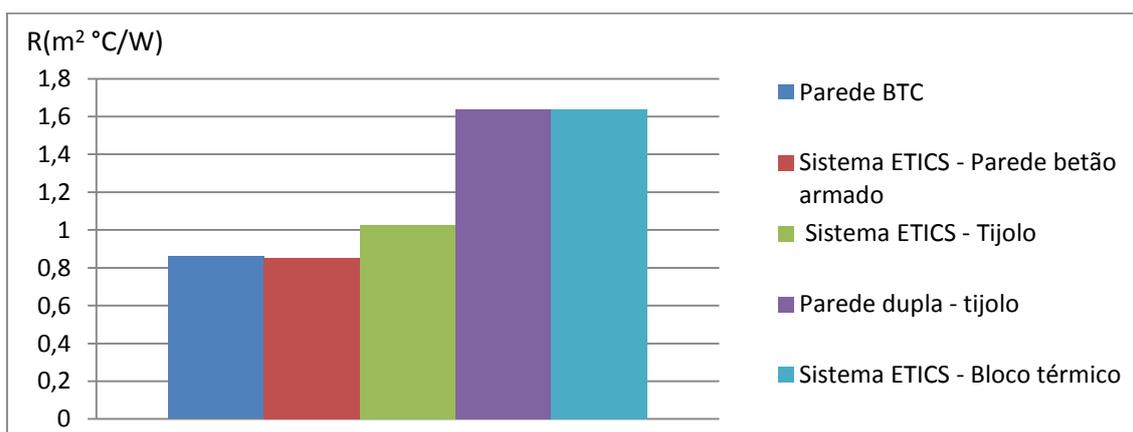


Figura 5. 25: Comparação das resistências térmicas das soluções construtivas.

No entanto, e como referido anteriormente, esta comparação não é linear, dado que os aligeiramentos e as espessuras dos blocos e tijolos são diferentes das dos BTC. Sendo que os aligeiramentos e as espessuras têm uma influência significativa nos valores da resistência térmica.

5.3 Considerações finais

Após a comparação das soluções de parede correntemente utilizadas com a solução de parede em BTC com SRG da região Minho, salientam-se algumas das vantagens e

desvantagens das paredes convencionais mais utilizadas, as de alvenaria de tijolo e de blocos de betão.

Relativamente às soluções de paredes em alvenaria de tijolo, estas têm como vantagem a economia de execução, facilidade de assentamento, facilidade na abertura de roços, espessuras e peso próprio razoáveis, materiais constituintes incombustíveis, bom comportamento higrotérmico, satisfaz as exigências mínimas de isolamento acústico. No entanto, têm como desvantagem a maior complexidade de execução no caso da parede dupla, exigência de mão-de-obra qualificada, a ausência de sistematização de produção nacional de acessórios e elementos para a resolução de pontos singulares das paredes origina situações de improviso e deficiente qualidade construtiva.

Em relação às soluções de paredes em blocos de betão, estas têm como vantagem o bom comportamento à compressão, elevada resistência ao fogo, bom isolamento acústico e a facilidade de assentamento. Mas apresenta como desvantagens o elevado peso próprio, elevada absorção de humidade, reduzido isolamento térmico e a dificuldade de abertura de roços.

Já as soluções com paredes em BTC com SRG da região Minho têm como vantagem o baixo custo de produção, facilidade de adaptação às diversas necessidades técnicas, sociais e hábitos culturais, tecnologia de fácil aprendizagem. Contudo, os BTC possuem também algumas limitações como a necessidade de estabilização adequada do solo, impossibilidade de construção de grandes vãos e de edifícios em altura e a falta de regulamentação adequada.

Esta técnica demonstra ter grande potencial quando comparada com as outras técnicas construtivas existentes no mercado de construção. Em termos termoenergéticos tem um desempenho equivalente às paredes correntemente utilizadas que utilizam outro tipo de soluções, contudo, tem a vantagem de utilizar um material com elevado grau de sustentabilidade, e que certamente terá um desempenho higrotérmico melhor que as restantes, sendo que deverão ser feitos estudos que comprovem o que é senso comum e a vivência das pessoas nos edifícios que utilizam os BTC.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Com a realização deste trabalho experimental foi possível retirar algumas conclusões. Para tal, importa lembrar que o objetivo principal do mesmo, consistiu no estudo/análise do comportamento termoenergético de blocos de terra comprimida (BTC) ativados alcalinamente através de cinzas volantes.

Uma vez que os BTC são realizados com SRG, convém salientar que o solo é um sistema multifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas de diferentes formas e tamanhos. Pode afirmar-se que o seu comportamento térmico enquanto meio multifásico é regulado pelas características térmicas de cada um dos seus constituintes.

Um dos objetivos da realização deste trabalho de investigação prático era a caracterização da resistência térmica dos BTC. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos das medições efetuadas em laboratório e depois de analisados os 5 pontos de medição chegou-se a uma resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2\text{C/W}$. No entanto, este valor apenas corresponde ao bloco, ao qual foi somada a resistência térmica superficial das duas faces da parede. Obteve-se assim um valor final de resistência térmica do elemento de $0,42 \text{ m}^2\text{C/W}$.

Analisando os resultados obtidos para a parede simples com junta seca, verifica-se que os valores obtidos para a resistência térmica dos BTC estão dentro do intervalo de

valores considerados normais ou correntes para as ditas soluções convencionais, ou seja, esta técnica construtiva a nível térmico não difere muito, comparativamente com as técnicas atualmente utilizadas. No entanto, convém salientar que os BTC ensaiados foram todos eles realizados de forma manual sem mão-de-obra especializada, assim como, todo o processo de fabrico e cura, foi acelerado de forma a conseguir realizar aos ensaios nos prazos previstos., Possivelmente, por exemplo, com tempos de cura superiores nos BTC, possibilitaria a obtenção de melhores resultados de resistência térmica.

Através da realização de medições em 3 paredes de constituição diferente (parede junta seca, parede junta barrada por betume e parede junta barrada por betume com 2cm de aglomerado de cortiça), foi possível compreender a variação do comportamento termoenergético dos BTC em conjunto com outros elementos construtivos. Verifica-se que da parede junta seca para a parede com junta preenchida por betume a variação do valor da resistência térmica é pouco significativa, no entanto quando comparado a parede junta seca com a parede com junta barrada por betume e 2 cm de isolamento térmico verificamos que há uma melhoria significativa no valor da resistência térmica passando de $0,16 \text{ m}^2\text{°C/W}$ para $0,60 \text{ m}^2\text{°C/W}$. No entanto, estes valores apenas correspondem aos materiais, ao qual foi somada a resistência térmica superficial das duas faces da parede, assim o valor de resistência térmica do elemento passa de $0,42 \text{ m}^2\text{°C/W}$ para $0,86 \text{ m}^2\text{°C/W}$.

Através da comparação da parede em BTC com SRG da região Minho com as soluções convencionais, verifica-se que esta nova técnica apresenta valores de resistência térmica e valores de coeficiente de transmissão térmica bastante próximos das ditas soluções convencionais.

O desenvolvimento deste trabalho prático pretendia demonstrar o potencial de aplicação dos BTC, do ponto de vista térmico, que fica demonstrado através da análise de resultados efetuada. No capítulo 5 é efetuada a comparação de resistências térmicas de BTC com materiais de construção correntemente utilizados, onde se verifica que os BTC apresentam resultados bastante próximos dos blocos de betão. Ainda no capítulo 5 é efetuada a comparação da solução de parede construtiva em BTC (junta barrada por betume com 2cm de aglomerado de cortiça) com soluções construtivas correntemente utilizadas, em que se verifica que os valores de resistência térmica são bastante

próximos. Fica assim comprovado o potencial da técnica construtiva em BTC com SRG da região Minho.

De salientar um outro ponto muito importante, o impacto destas construções em termos ambientais. Os impactos ambientais para obtenção do betão são cada vez maiores, desde a extração do calcário até à obtenção dos agregados através de pedreiras. Em resultado disto, na última década tem vindo a crescer o interesse em torno da criação de alternativas das quais as técnicas e materiais de construção antigos têm sido contemplados.

Conclui-se assim que a técnica de construção em terra com BTC com SRG do Minho permite respeitar as exigências regulamentares, do ponto de vista do comportamento termoenergético, salientando-se o seu reduzido impacto ambiental na construção.

6.2 Perspetivas futuras

O estudo do comportamento térmico de blocos de terra comprimida (BTC) ativados alcalinamente através de cinzas volantes é um trabalho contínuo e que permite vários desenvolvimentos no futuro. Apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros:

- Realização do ensaio térmico dos BTC em conjunto com outros elementos construtivos. Apesar destes ensaios já terem sido efetuados, seria interessante testar com outras espessuras de isolamentos, de forma a ser possível observar a variação do comportamento energético dos BTC com os diferentes elementos construtivos. Uma vez que apenas foram testadas paredes simples seria também interessante proceder aos mesmos ensaios em paredes duplas.
- A caracterização do comportamento térmico dos BTC com SRG pode ser realizada através de ensaios de laboratório ou ensaios in situ. Uma vez que os ensaios efetuados foram laboratoriais seria interessante proceder aos mesmos ensaios desta vez em campo, de forma a perceber o comportamento energético dos BTC em aplicações reais.
- Analisar o comportamento termoenergético de BTC com outras misturas para tentar encontrar a mistura que conduz ao melhor desempenho;
- Analisar outras componentes dos BTC, como o desempenho higratérmico.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C1155.2001, Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data 1

ASTM C1046.2001, Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.

BRAGA, A., & Rocheta, V. (2008). A construção em terra e a sustentabilidade. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10400.1/80>.

CASTANHEIRA, Guilherme; BRAGANÇA, Luis. – “Benefícios Energéticos da Construção em Terra para Habitações Populares de Portugal”, 2012.

Correia, M. (2006). Universalidade e diversidade da arquitectura de terra, 12–19.

Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto. Sistema de Certificação Energética dos Edifícios.

Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto ANOTADO. Certificação Energética e Ar Interior.

Despacho (extrato) n.º 15793-C/2013. Sistema de Certificação Energética dos Edifícios.

EIRES, Rute; JALALI, Said. - “Terra em Seminário”. V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 2007.

FARIA, H. (2012). Desenvolvimento de uma solução para a construção de taipa no Minho baseada na ativação alcalina.

Gomes, R. J., & Folque, J. de B. (1953). LNEC - o uso de terra como material de construção.

ISO 9869, Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, International Organization for Standardization (ISO), 1994

Jalali, S., & Eires, R. (2008). Inovações científicas de construção em terra crua.

LIMA, Sofia Araújo; VARUM, Humberto; SALES, Almir – “TEMA 3 – Caracterización de materiales”. Análise da resistência mecânica e da absorção de blocos de terra comprimida feitos com cinza do bagaço da cana-deaçúcar.

LOPES, Henrique; VIEIRA, Ana; SOARES, Sofia. (2014). Caracterização térmica de um solo pelo hot wire method .

LOPES, Vanessa Filipa Cordeiro – Estudo da viabilidade da incorporação de resíduo de sisal em BTC: Aveiro: Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil. 2012. Dissertação de Mestrado.

Murta, A., Varum, H., Pinto, J., Bentes, I., Paiva, A., & Ramos, L. (2010). Benefícios económicos e ambientais inerentes ao uso de materiais estruturais naturais em habitações unifamiliares, 7–22.

OLIVEIRA, Daniel V.; SILVA, Rui A. – “Alvenaria e Construções Antigas”. Construir em terra ainda faz sentido?, 2012.

PEREIRA, João Paulo Beja – Análise do comportamento térmico de paredes de taipa: Évora: Universidade de Évora Escola de Ciências e Tecnologias. 2013. Dissertação de Mestrado.

Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) - (decreto-lei n.º 118/2013 de 20 de agosto).

Santos, C. A. P. dos; Matias, L., 2006. Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Lisboa: LNEC.

SOARES, Edgar Manuel Magina – Melhoria do Solo Residual Granítico com Recurso à Activação Alcalina de Cinzas Volantes: Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro Escola de Ciências e Tecnologia. 2013. Dissertação de Mestrado.

SOARES, Nuno Gabriel Lobo – Soluções Construtivas Tradicionais de Revestimento de Paredes Exteriores em Tabique: Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro Escola de Ciências e Tecnologia. 2012. Dissertação de Mestrado.

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). O renascimento da construção com alvenaria de terra.

Torgal, P., Eires, R., & Jalali, S. (2009). Construção em terra.

VELOSA, Ana Luisa; VARUM, Humberto. – “Velhos Materiais, Novas Utilizações”.

[1] <http://www.saharachildren.org/> [Acedido em 20 de Março de 2015].

[2] <http://www.portalsaofrancisco.com.br/> [Acedido em 20 de Março 2015].

[3] <http://www.flickr.com/photos/,2001> [Acedido em 22 de Março de 2015].

[4] <http://www.algarvepressdiario.blogspot.com,2011> [Acedido em 30 de Março 2015].

[5] <http://www.yourhome.gov.au> [Acedido em 3 de Abril 2011].

[6] <http://whc.unesco.org/en/list/> [Acedido em 3 de Abril 2015].

[7] <http://www.artebel.pt/> [Acedido em 7 de Junho 2015].

[8] <http://www.preceram.pt/> [Acedido em 7 de Junho 2015].

