



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Comportamento térmico do sistema modular GEOGREEN, com incorporação de PCMs

(Versão final após defesa pública)

Roberto Carlos Gama Marques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo de Castro Gomes

Covilhã, outubro de 2016

Dedicatória

Aos meus pais e irmão

Agradecimentos

Ao Professor Catedrático João Paulo de Castro Gomes, do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior, pela orientação científica, disponibilidade, comentários e sugestões ao longo da elaboração da presente dissertação.

Ao Sr. Jorge Bento, Bolseiro técnico do Laboratório de Construção - Ensaios químicos e Durabilidade, do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, da Universidade da Beira Interior, pela valiosa ajuda prestada.

Ao colega Luís Almeida, estudante finalista de mestrado do Curso de Engenharia Informática da Universidade da Beira Interior, pelo desenvolvimento do software GEOGREENPLUS e ajuda prestada.

Aos meus colegas de curso e amigos, em especial aos colegas Hugo Canilho e André Belgas, agradeço a amizade e todo o apoio prestado durante a elaboração da presente dissertação.

Agradeço aos meus pais e irmão, todo o apoio, compreensão e pelos esforços que fizeram, para que isto se tornasse possível.

A todos, Um Muito Obrigado!

Resumo

Neste trabalho estuda-se o comportamento térmico do sistema modular GEOGREEN, melhorado com materiais de mudança de fase (PCM). Sendo o sistema modular GEOGREEN produzido com materiais ativados alcalinamente, contendo também aglomerado negro expandido de cortiça e vegetação natural, este trabalho insere-se numa perspetiva de desenvolvimento sustentável, não só pela incorporação de resíduos de minas e vidro, mas também na eficiência energética, nomeadamente com a adição de PCM.

Assim, neste trabalho, caracterizaram-se os resíduos de minas, tendo-se nomeadamente determinado a sua composição granulométricas e composição química. Produziram-se agregados artificiais incorporando grandes quantidades de PCM. Estudaram-se as propriedades mecânicas das argamassas de materiais ativados alcalinamente com incorporação de PCM. Produziram-se placas de base do sistema GEOGREEN que, finalmente foram submetidas a ensaios de clima real, possibilitando o estudo termo-higrométrico numa célula de ensaio em clima real. Estes ensaios permitiram avaliar, preliminarmente, a influência da incorporação de PCM no sistema GEOGREEN, do ponto de vista do seu contributo para o comportamento térmico dos edifícios.

Palavras-chave

Estudo experimental, sistema modular GEOGREEN, comportamento térmico, materiais mudança de fase, paredes vivas, materiais ativados alcalinamente, lamas residuais, vidro moído

Abstract

This project studies the GEOGREEN system thermal behavior improved with phase change materials (PCM). Being the modular system GEOGREEN produced with materials alkali-activated, black cork agglomerate and natural vegetation, this project is part of a perspective of sustainable development, not only because the incorporation of mine waste and glass, but also on energy efficiency, including the PCM.

In this project, we characterized the mine waste, in particular their particle size and chemical composition. We produced the artificial aggregates incorporating PCM. We studied the mechanic properties of the alkali-activated mortars with PCM. We produced the bases for the GEOGREEN system and then subject to real weather test, allowing the thermo-hygrometric study in a test cell. These tests allowed evaluate the influence of PCM incorporated in GEOGREEN system about his contribution to the thermal building performance.

Keywords

Experimental study, GEOGREEN modular system, thermal behavior, phase change materials, living walls, alkali-activated materials, mud waste, glass powder

Índice

Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Acrónimos e Siglas.....	xxi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação	2
2 Sistema GEOGREEN	5
2.1 Superfícies ajardinadas	5
2.2 Sistema modular GEOGREEN	9
2.3 Materiais ativados alcalinamente	10
2.4 Comportamento térmico do sistema modular GEOGREEN.....	13
2.5 Materiais mudança de fase	16
3 Estudo experimental.....	17
3.1 Caracterização e processamento dos materiais ativados alcalinamente	17
3.1.1 Precursores.....	17
3.1.2 Ativadores	21
3.1.3 Moagem	23
3.1.4 Peneiração.....	24
3.1.5 Composição química	25

3.1.6	Análise granulométrica por difração laser.....	27
3.2	Caracterização e processamento das bases do sistema GEOGREEN com PCM	29
3.2.1	Argila expandida.....	29
3.2.2	Material mudança de fase (PCM).....	30
3.2.3	Resina, Catalisador e acelerador	31
3.2.4	Pó de Granito	32
3.2.5	Processo de fabrico dos agregados artificiais com PCM	32
3.2.6	Produção das bases do sistema GEOGREEN com PCM.....	36
3.2.7	Ensaio da resistência à compressão	38
3.2.8	Ensaio do comportamento térmico em clima real	39
4	Conclusão e trabalhos futuros.....	49
4.1	Considerações finais.....	49
4.2	Propostas de trabalhos futuros	50
5	Referências bibliográficas	51

Lista de Figuras

Figura 2.1-Estação ferroviária West Kowloon Terminus, Hong Kong[6]	6
Figura 2.2-Fachada com aplicação de vegetação em a) e os seus resultados através de uma câmara de infra-vermelhos a uma temperatura de 21°C no exterior [5]	7
Figura 2.3-Exemplos de sistemas de paredes vivas. Sistema baseado em caixas de plástico com solo a), sistema baseado com substrato em forma de espuma b), Sistema baseado em camadas de feltro c) [5]	8
Figura 2.4-Cobertura ajardinada, British Horse Society, Warwickshire, Inglaterra[7]	9
Figura 2.5-Peça Modular GEOGREEN com vegetação	10
Figura 2.6-Peça Modular com vegetação	10
Figura 2.7-Momentos históricos importantes acerca de materiais obtidos por ativação alcalina[9]	11
Figura 2.8-Célula de ensaio com parede GEOGREEN[15]	13
Figura 2.9 - Planta e corte da célula de testes[15].....	13
Figura 2.10-Temperatura ambiente exterior e radiação solar global.....	14
Figura 2.11- Temperatura superficial Interior na parede de referência ($T_{s\ ref}$) e parede GEOGREEN ($T_{s\ G}$)	15
Figura 3.1-Localização na região Centro (Google maps, 2016)	18
Figura 3.2-Barragem de depósito das lamas da mina da Panasqueira	19
Figura 3.3-Vista aérea das minas da Panasqueira e localização do sítio de recolha das lamas residuais (Google maps, 2016)	19

Figura 3.4- Lamas residuais das minas da Panasqueira	21
Figura 3.5- Vidro Moído	21
Figura 3.6-Metacaulino.....	21
Figura 3.7-Bolas metálicas comparadas com a dimensão de uma moeda de 1€	23
Figura 3.8-Ensaio de Los Angeles.....	23
Figura 3.9-Peneiração mecânica	24
Figura 3-10- Análise granulométrica das lamas residuais.....	27
Figura 3.11- Análise granulométrica do vidro moído	28
Figura 3.12-Análise granulométrica do metacaulino	28
Figura 3.13-Aspecto da argila expandida ARGEX.....	29
Figura 3.14-Eschema do sistema de impregnação	35
Figura 3.15-Sistema de impregnação	35
Figura 3.16-Produto final de argila dos agregados artificiais com PCM	35
Figura 3.17-Base GEOGREEN com materiais mudança de fase.....	37
Figura 3.18-Prensa e dispositivo utilizado no ensaio à compressão.....	38
Figura 3.19-Câmara de testes com identificação das câmaras (A e B) e a disposição dos sensores	40
Figura 3.20-Vista interior de uma câmara com a aplicação do poliestireno extrudido.....	41
Figura 3.21-Vista exterior da câmara com os dois tipos de placas GEOGREEN	41

Figura 3.22-Software GEOGREENPLUS em funcionamento	42
Figura 3.23-Sensor interior de humidade e temperatura conectado à placa Arduino	42
3.24-Sensor de luminosidade (em cima) e sensor exterior de humidade e temperatura (em baixo)	42
Figura 3.25-Luminosidade (lux) da primeira semana.....	44
Figura 3.26-Humidade exterior (Hext ref), humidade da câmara A (HcA ref), humidade da câmara B (HcB ref), da primeira semana.....	44
Figura 3.27-Temperatura exterior (Text ref), temperatura da câmara A (TcA ref), temperatura da câmara B (TcB ref), da primeira semana	45
3.28-Diferencial de temperatura entre a câmara B e a câmara A na primeira semana	45
Figura 3.29-Luminosidade (lux) da segunda semana	46
Figura 3.30-Humidade exterior (Hext), humidade da câmara A (HcA) e humidade da câmara B (HcB) durante a segunda semana.....	46
Figura 3.31-Temperatura exterior (Text), temperatura da câmara A (TcA), temperatura da câmara B (TcB) durante a segunda semana.....	47
Figura 3.32-Diferencial de temperaturas entre a câmara B e a câmara A na segunda semana.....	48
Figura 4.1-Diferencial de temperatura entre a câmara B com o GEOGREEN sem substrato e vegetação e a Câmara B nua.....	50

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Características físicas do Metacaulino MASTERLIFE MK828.....	20
Tabela 2.2- Composição química do Metacaulino MASTERLIFE MK 828.....	20
Tabela 2.3- Composição química do silicato de sódio em percentagem elementar	22
Tabela 2.4- Composição química de óxidos das lamas, vidro moído e metacaulino	25
Tabela 2.5- Composição elementar das lamas e do vidro moído.....	26
Tabela 3.6- Características da argila expandida ARGEX.....	30
Tabela 3.7- Características da parafina RT 25 HC	30
Tabela 3.8- Quantidade dos elementos constituintes para a resina final para 250 g de argila expandida	31
Tabela 3.9- Características da resina PALATAL P4-01	31
Tabela 3.10- Características Físico-Mecânicas do Granito Cinza Pinhel	32
Tabela 3.11- Quantidade da mistura de precursores e PCM	36
Tabela 3.12- Quantidade dos diferentes componentes da mistura	36
Tabela 3.13- Resultados dos ensaios de compressão	39

Lista de Acrónimos e Siglas

Al	Alumínio
AlO ₄	Aluminato
Al ₂ O ₃	Alumina - óxido de alumínio
Ca	Cálcio
CaO	Cal - óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Cal hidratada - hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
EDX	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X
EN	Norma Europeia
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
Fe ₂ O ₃	Hematita - óxido de ferro
H ₂ O	Água
H ₃ O	Hidrónio
K	Potássio
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Na	Sódio
NaOH	Soda cáustica - hidróxido de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NH ₄	Amónio
NP	Norma Portuguesa
O	Oxigénio
pH	Potencial hidrogeniónico
PVC	Policloreto de vinil
SEM	Microscópio eletrónico de varrimento
Si	Silício
SiO ₂	Sílica - dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
TEM	Microscopia eletrónica de transmissão
XRD	Difração de raios-X
°C	Graus celsius

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente, uma das grandes preocupações da política Europeia incide sobre a poupança energética e a promoção de uma economia circular, baseada na reutilização de resíduos industriais provenientes de diferentes setores.

Entre outros, a indústria mineira europeia produz uma grande parcela do total de resíduos industriais, que na maioria são depositados em escombreciras de céu aberto ou aterros sanitários, pondo em risco o ambiente e a saúde pública. A preocupação para a reutilização destes resíduos está em voga hoje em dia, tendo sido iniciada uma linha de investigação na Universidade da Beira Interior neste domínio, desde 2007, contudo a dificuldade está na valorização e na sua incorporação por parte da indústria de construção.

A tecnologia mais promissora com vista à incorporação de resíduos industriais na fileira da construção consiste na sua ativação alcalina para produção de novos materiais, nomeadamente materiais de construção. Os materiais ativados alcalinamente consistem numa mistura de uma estrutura amorfa a semi-cristalina, de presa rápida, com elevada resistência em curto espaço de tempo resultado da ligação de aluminossilicatos com uma solução alcalina. Estes ligantes apresentam características físicas e mecânicas superiores ao cimento Portland e, principalmente, são materiais mais eficientes energeticamente e a sua obtenção não produz emissões de CO₂ como no caso do cimento Portland. [1]

Por outro lado, como foi referido inicialmente a poupança energética é também uma das preocupações Europeias. Hoje em dia, grande quantidade de energia provem dos combustíveis fósseis, sendo estes recursos naturais finitos. Em resposta a este problema, várias técnicas têm vindo a ser investigadas que estão relacionadas com o aquecimento e arrefecimento dos edifícios melhorando a sua eficiência térmica. Uma das técnicas mais efetivas passa pela utilização de

materiais de mudança de fase (PCM). Estes materiais têm a particularidade de absorver o calor quando se transformam do estado sólido para líquido e, libertá-lo, quando volta ao estado sólido. [2]

Assim, neste contexto, e numa perspetiva multidisciplinar, este trabalho tem como objetivo de continuar com estudos anteriores, com vista ao melhoramento do sistema modular GEOGREEN, sendo este um sistema com preocupações de sustentabilidade, e uma alternativa, ou opção, para a execução de superfícies ajardinadas[3]. O sistema modular GEOGREEN combina materiais ativados alcalinamente obtidos com uma mistura de lamas das minas da Panasqueira, adicionando a este sistema modular, na sua constituição, materiais mudança de fase, e conseqüentemente avaliar o seu comportamento térmico numa célula de ensaios em clima real.

1.2 Objetivos

O objetivo específico é a adição de materiais de mudança de fase (PCM) no sistema modular GEOGREEN para melhorar o seu comportamento térmico. Para tal, foi desenvolvido um processo de incorporação de PCM na argamassa de materiais ativados alcalinamente de lamas provenientes das minas da Panasqueira, que constituem a base do sistema GEOGREEN.

Neste sentido, foi analisado o comportamento termo-higrométrico interior deste novo sistema modular GEOGREEN com adição de PCM, sem vegetação e substrato, recorrendo a uma célula de testes em clima real.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação tem 5 capítulos, incluindo este, na sua estrutura. Esses capítulos são organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta o sistema modular GEOGREEN, numa introdução à importância das superfícies ajardinadas. São apresentadas as vantagens, em várias vertentes, para os edifícios que são portadores de superfícies ajardinadas quer em fachadas ou em coberturas. São analisados historicamente os materiais ativados alcalinamente. É também apresentado estudos que já foram realizados com o sistema GEOGREEN, desenvolvido inicialmente, o qual, não incorporava materiais mudança de fase. Por fim, introduz-se os materiais mudança de fase e os seus benefícios.

O capítulo 3 são apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados que constituem a base do sistema modular GEOGREEN. Descrevem-se as características dos materiais utilizados para a produção de agregados artificiais impregnados com PCM. Encontra-se também descrito a metodologia e quantidades para a produção dos mesmos, assim como, a metodologia e quantidades para a produção da peça final (GEOGREEN com PCM). Por fim, descreve-se a metodologia e procedimento experimental para a realização de ensaios de comportamento térmico em célula de ensaios em clima real, do sistema GEOGREEN com e sem PCM.

O capítulo 4 apresenta e analisa os resultados obtidos, bem como, todas as conclusões que podem ser retiradas deste trabalho. Apresenta-se também algumas sugestões para trabalhos futuros.

No fim do trabalho apresentam-se as referências bibliográficas.

2 Sistema GEOGREEN

Neste capítulo apresenta-se o sistema modular GEOGREEN. São apresentadas as vantagens, em várias vertentes, para os edifícios com superfícies ajardinadas, na sua envolvente exterior, quer em fachadas ou em coberturas.

É apresentada uma síntese histórica dos materiais ativados alcalinamente e são caracterizados esses mesmos materiais que constituem a base do sistema modular GEOGREEN.

É apresentado um estudo do comportamento térmico do sistema GEOGREEN em condições mediterrânicas.

Por fim é descrito a utilidade de usar os materiais mudança de fase para uma melhor eficiência térmica nos edifícios.

2.1 Superfícies ajardinadas

A utilização de superfícies ajardinadas, quer em climas frios ou mesmo quentes, é conhecida desde os primórdios da humanidade. Nos dias de hoje, a sua utilização é focada com a questão de poupança de energia e de redução da poluição ambiental. Esteticamente, as coberturas e fachadas verdes criam um ambiente moderno e que se altera ao longo do tempo. Permitem melhorar a eficiência energética de edifícios, originando um arrefecimento no verão e uma proteção térmica no inverno.

Está provado por vários estudos que o uso de superfícies ajardinadas nas habitações resulta numa redução de 5.5°C no seu interior, conseqüentemente uma redução anual de 8% em energia consumida por aparelhos de ar condicionado[4].

A aplicação de vegetação nas superfícies pode mudar drasticamente o aspeto estético, tem uma influencia bastante positiva no conforto e no bem-estar

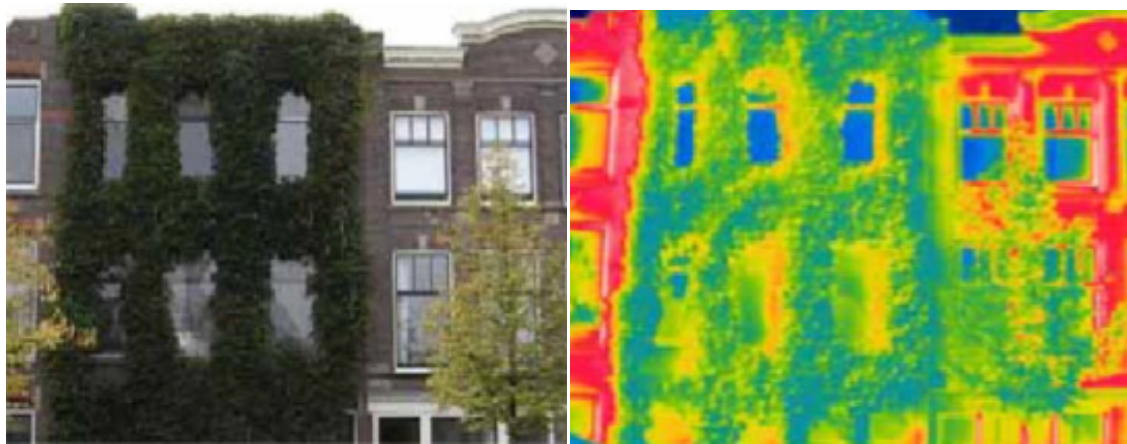
dentro e ao redor do edifício. Na utilização destes elementos ajardinados cria-se áreas privadas ou públicas de socialização e recreio ou mesmo criar espaços para horticultura ou agricultura (Figura 2.1)[5].



Figura 2.1-Estação ferroviária West Kowloon Terminus, Hong Kong[6]

As superfícies ajardinadas têm um grande impacto em várias questões sociais e económicas e outras, nomeadamente nos seguintes aspetos[6]:

- Ajudam a reduzir a poluição sonora e contribuem para a melhoria da qualidade do ar;
- Contribuem para a redução do efeito “ilha de calor” das cidades;
- Contribuem para a retenção de água da chuva, reduzindo o caudal que é encaminhado para os coletores de águas pluviais, ajudando a diminuir o risco de inundações;
- Retardam, em caso de incêndio, a propagação do fogo na cobertura;
- Protegem as estruturas dos edifícios, contribuindo para um aumento do tempo de vida dos sistemas de impermeabilização;
- Melhoram o isolamento térmico e acústico dos edifícios, contribuindo para reduzir o consumo energético. Verifica-se na Figura 2.2 a diferença de temperatura na fachada devido a aplicação de vegetação.

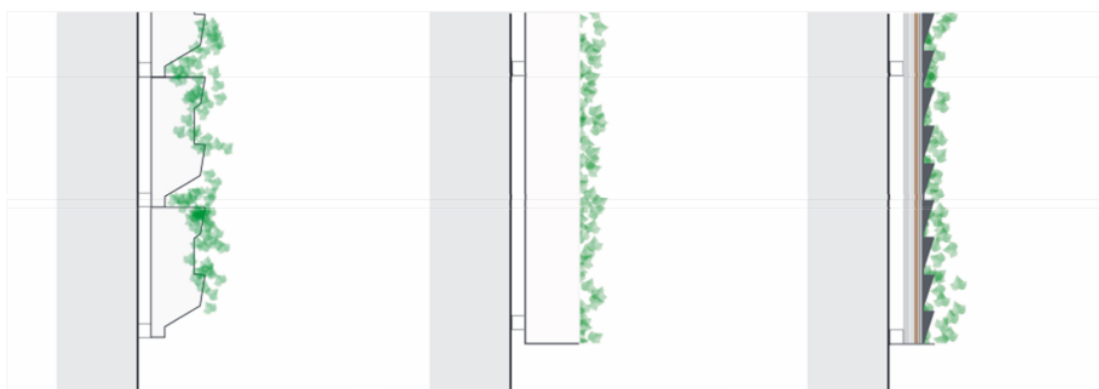


a)

b)

Figura 2.2-Fachada com aplicação de vegetação em a) e os seus resultados através de uma câmara de infra-vermelhos a uma temperatura de 21°C no exterior [5]

Os sistemas de fachada ajardinada podem ser classificados como fachadas verdes, jardins verticais ou paredes vivas (na nomenclatura inglesa “green façades”, “vertical gardens” ou “living walls”. O sistema de paredes vivas é construído por painéis modulares que contêm solo e todos os nutrientes necessários para a sobrevivência da planta. Nos últimos anos vários sistemas forma desenvolvidos, cada um com características diferentes[5]. Por exemplo, a parede viva da Figura 2.3 tem um princípio diferente de crescimento e conceção. O sistema (a) é baseado em caixas de plástico com solo, o sistema (b) é baseado num substrato em forma de espuma com barras de ferro como suporte e o sistema (c) é baseado em camadas de feltro atuando como substrato e impermeabilizando, sendo suportado por PVC.



a)

b)

c)

Figura 2.3-Exemplos de sistemas de paredes vivas. Sistema baseado em caixas de plástico com solo a), sistema baseado com substrato em forma de espuma b), Sistema baseado em camadas de feltro c) [5]

No caso de coberturas (Figura 2.4), existem três tipos de superfícies ajardinadas [6].

- **Intensivas:** São concebidas para neles se instalar um jardim ou uma plantação uso humano (incluindo agrícola) devendo estar dimensionados para suportar a carga a que ficam sujeitos, dada a espessura do solo. Requerem instalação de sistema de rega por profissionais e manutenção regular. Existem mesmo já restaurantes com hortas no telhado. Neste tipo de cobertura com vegetação intensiva podem ser construídos lagos com diversas formas e tamanhos. Um lago oferece um elemento visual extra, constitui uma fonte de água para os pássaros se saciarem e são um habitat natural para os peixes.
- **Extensivas:** Núcleos naturais que replicam espaços geológicos utilizando plantas resistentes à seca e com pouca necessidade de irrigação. São bastante leves e dispensam estruturas complexas para proliferarem. A colocação deste género de coberturas e os seus custos de manutenção são residuais. O tipo de plantas seleccionadas é mais natural e auto-suficiente, geralmente adaptando-se a espessuras de solo ou de substrato pequenas. Quando comparado com o intensivo, este sistema permite reduções no peso global do sistema e é encarado normalmente como uma solução ligeira de coberturas ajardinadas, podendo inclusive ser um espaço não visitável.
- **Semi-intensivas:** Este é um sistema intermedio entre os sistemas anteriores em que se tem um espaço visitável, mas em que se tem uma solução de meio-termo entre o sistema extensivo que não requer manutenção (ou esta é residual) e o sistema intensivo que requer um acompanhamento permanente. São utilizados perfis de substrato superiores aos do sistema extensivo, que permitem uma mais vasta escolha de espécies a utilizar, mas que também representam uma maior manutenção e maior custo que o sistema extensivo.



Figura 2.4-Cobertura ajardinada, British Horse Society, Warwickshire, Inglaterra[7]

2.2 Sistema modular GEOGREEN

O sistema modular GEOGREEN foi desenhado no âmbito de um projeto financiado pela FCT (Fundação para a ciência e tecnologia) e teve como objetivo a criação de um sistema de peças modulares com vegetação para a formação de fachadas e coberturas ajardinadas, adaptáveis a edifícios novos ou a reabilitar. O Projeto foi coordenado pelo Prof. João Castro Gomes.

As peças modulares caracterizam-se por serem adaptáveis a diversas configurações e superfícies, quer horizontais, quer verticais, quer inclinadas ou curvas. Estas peças são constituídas com a associação de diferentes materiais, combinando propriedades como a baixa densidade, porosidade, retenção de água, isolamento térmico, resistência, durabilidade e resistência ao fogo [8].

Esta solução tem como foco o desenvolvimento de um painel de revestimento, reaproveitando os resíduos industriais, incorporando vegetação resistente às condições de clima mediterrâneo seco. Cada peça modular é composta por uma base de materiais ativados alcalinamente e uma placa de aglomerado negro de cortiça (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), incorporando, a vegetação (Figura 2.6).



Figura 2.5-Peça Modular GEOGREEN



Figura 2.6-Peça Modular com vegetação

2.3 Materiais ativado alcalinamente

A comunidade científica tem desenvolvido investigações sobre ligantes alternativos ao cimento Portland, pois, além de fraco desempenho ambiental os cimentos produzidos apresentam uma deficiente durabilidade. As estruturas edificadas com betão armado têm ao longo dos anos sofrido uma deterioração precoce. A percentagem elevada de cal presente nos ligantes torna-os suscetíveis a ataques químicos e permeabilidade acentuada originando carbonatação e corrosão das armaduras [9].

O estudo dos ligantes ativado alcalinamente remonta aos anos 40, a Figura 2.7 apresenta uma relação cronológica de acontecimentos relevantes no domínio dos ligantes obtidos por ativação alcalina [9].

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo " Geopolímero"
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento " <i>Pyrament</i> "
Krivenko	1986	Sistemas $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	Activação de escórias sintéticas
Malek. <i>et al.</i>	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioactivos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal <i>et al.</i>	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar <i>et al.</i>	1989	Activação de escórias - $C_{12}A_7$
Talling e Brandstetr	1989	Activação alcalina de escórias
Wu <i>et al.</i>	1990	Activação de cimento de escórias
Roy <i>et al.</i>	1991	Presa rápida de cimentos activados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos activados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovsky	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias activadas alcalinamente

Figura 2.7-Momentos históricos importantes acerca de materiais obtidos por ativação alcalina[9]

Purdon [10], em 1940, foi o pioneiro a estudar este tipos de materiais utilizando escórias de alto-forno ativadas por uma solução alcalina. Denotou que numa primeira fase do processo ocorria a libertação de sílica, alumina e hidróxido de cálcio. Numa segunda fase constatou a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) bem como a regeneração da solução alcalina, concluindo assim, que hidróxidos alcalinos atuavam como catalisadores

Em 1959, Glukhovsky[11] através de estudos dos ligantes utilizados nas edificações romanas e nas pirâmides egípcias, concluiu que eram compostas por materiais idênticos ao do cimento Portland, aluminossilicatos cálcicos hidratados, e ainda por fases cristalinas de analcite, sendo este o motivo de durabilidade. Na continuação da sua investigação, desenvolveu um novo ligante

denominado de “solo-cimento”, formado por aluminossilicatos moídos e resíduos industriais de origem alcalina.

O engenheiro químico Joseph Davidovits, nos anos 70, no decorrer dos seus estudos sobre ligantes de ativação alcalina, concluiu que as pirâmides egípcias teriam sido construídas com ligantes produzidos localmente. Estes ligantes eram obtidos de uma mistura de calcário proveniente de Gizé com hidróxido de sódio, misturando água, cal e carbonato de sódio [1]. Posteriormente, desenvolveu e patenteou estes mesmos ligantes de ativação alcalina e em 1979 criou o termo, até hoje utilizado, “geopolímero”. Este termo caracteriza estes materiais de estrutura amorfa que têm a capacidade de se transformar, policondensar e adotar diferentes formas a baixas temperaturas. Na concepção do geopolímero ocorre uma reação química estabelecida num meio alcalino, onde a sílica e a alumina reagem entre si criando polímeros com ligações do tipo polissialato (Si-O-Al-O), sendo esta reação denominada de geopolimerização[1], [12].

Em suma, materiais activados alcalinamente são polímeros inorgânicos e de estrutura amorfa a semi-cristalina, originados pela polimerização de matérias primas naturais de origem geológica (precursores). São ativados por uma solução de elevada alcalinidade (ativadores), devido aos precursores conterem um elevado teor de aluminossilicatos. O mecanismo de geopolimerização consiste na dissolução e policondensação ocorridos através de uma reação exotérmica.

A qualidade destes materiais é condicionada por vários fatores, sendo eles a composição química e mineralógica dos precursores, quantidade e concentração dos compostos alcalinos, temperatura e tempo de cura. O ativador pode ser constituído por uma única substancia ou varias, ativador simples ou composto [13], [14].

2.4 Comportamento térmico do sistema modular GEOGREEN

O sistema modular GEOGREEN foi desenvolvido para criar telhados e paredes verdes mais sustentáveis. Sobre este sistema foram publicados diversos estudos que apresentam as características do sistema e descrevem o seu comportamento térmico[15]. O desempenho térmico do sistema GEOGREEN foi estudado em condições de clima Mediterrânico. Baseou-se na avaliação das condições meteorológicas locais em três períodos diferentes. O sistema foi testado numa célula de ensaios exterior, que compara uma parede de referência e uma parede coberta de módulos GEOGREEN (Figura 2.8**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A análise foi baseada nas temperaturas superficiais e fluxos de calor superficiais de dois compartimentos com as mesmas dimensões e características térmicas (Figura 2.9)[15].



Figura 2.8-Célula de ensaio com parede GEOGREEN[15]

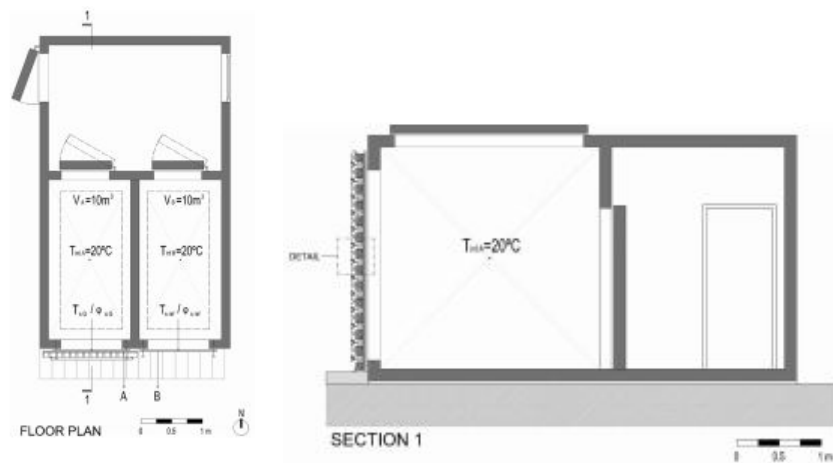


Figura 2.9 - Planta e corte da célula de testes[15]

No entanto, nos estudos realizados anteriormente os módulos GEOGREEN não continham materiais de mudança de fase tal como acontece neste trabalho, como será explicado com mais detalhe nos capítulos seguintes.

Consultando as publicações existentes, os resultados de comportamento térmico do sistema GEOGREEN, em determinadas condições de ensaio em clima real, demonstraram que o mesmo contribui para: reduzir as temperaturas máximas de superfícies interiores e aumentar a temperatura mínima de superfície interior até 7°C; reduzir a transferência de calor, reduzindo o fluxo de entrada máximo de calor em 75% e o fluxo máximo de calor de saída em 60%; melhorar o isolamento térmico de uma parede. Estes aspetos levam a reduzir custos de energia de ar condicionado e melhorar os edifícios.[15]

Um dos testes realizados teve como objetivo a comparação do comportamento termo-higrométrico da parede de referência com a parede coberta com o sistema GEOGREEN sem vegetação ou substrato, conforme se apresenta na Figura 2.10 e Figura 2.11.

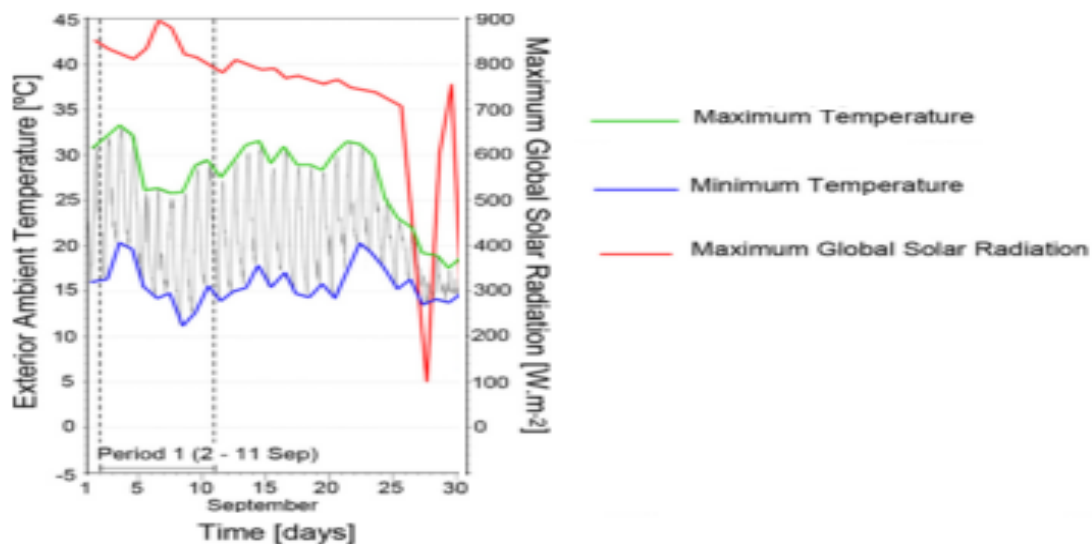


Figura 2.10-Temperatura ambiente exterior e radiação solar global

Na Figura 2.10 observa-se a temperatura exterior mínima e exterior máximo durante 30 dias, entre 2 a 11 de Setembro, com a parede coberta com o sistema

GEOGREEN simples sem substrato ou vegetação nas aberturas.

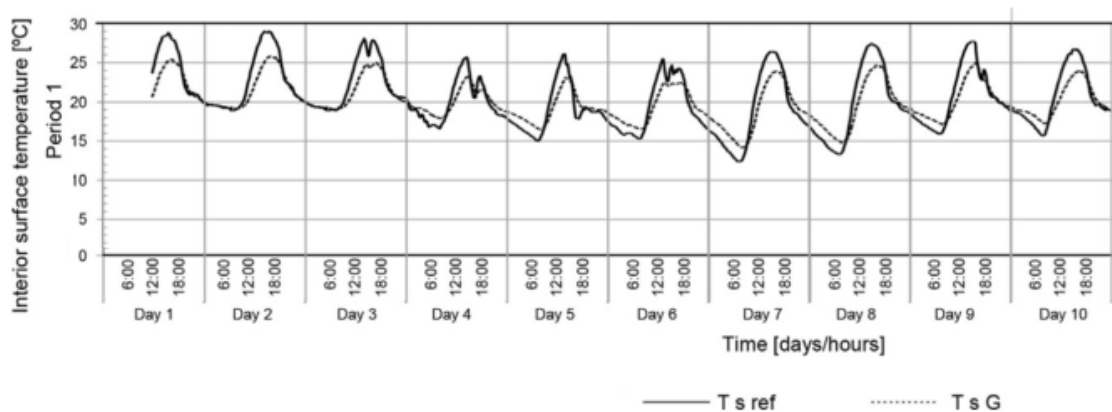


Figura 2.11- Temperatura superficial Interior na parede de referência ($T_{s,ref}$) e parede GEOGREEN ($T_{s,G}$)

A Figura 2.11 demonstra que há um melhoramento de temperatura térmica durante os períodos diurnos e noturnos entre a parede de referência e a parede com GEOGREEN simples. No período diurno há uma diminuição em média de 3°C e nos noturnos um aumento de 1°C durante os 10 dias de testes.

Pelos resultados obtidos, tal como foi confirmado pelos autores do estudo, os módulos GEOGREEN fornecem uma proteção termal adicional na estação de arrefecimento. A parede GEOGREEN reflete uma diminuição da amplitude termal média até 4.1°C . Aumenta a temperatura superficial mínima até $1,8^{\circ}\text{C}$ e reduz a temperatura superficial máxima até 3°C [15].

Neste trabalho publicado verificou-se também que os fluxos de calor ocorridos durante o dia em ambas as paredes alcançam o seu máximo nas tardes. Os resultados obtidos demonstram com os módulos GEOGREEN por si só têm impacto positivo na resistência térmica da parede[15].

Os resultados deste estudo serão comparados com os estudos realizados neste trabalho, tal como será apresentado no capítulo 3.

2.5 Materiais mudança de fase

Nos nossos dias, o homem tem procurado soluções alternativas e mais ecológicas na produção e utilização da energia. Uma enorme parcela da nossa energia produzida vem da utilização dos combustíveis fósseis, sendo eles limitados e a sua exploração cria um impacto negativo no nosso meio ambiente. Em resposta a este problema várias técnicas foram estudadas relacionadas com o aquecimento e arrefecimento dos edifícios, possibilitando uma melhor eficiência energética.

Segundo a Comissão Europeia, os edifícios representam 40% da energia consumida na EU, e o Horizon 2020 Programa de Investigação e Inovação da EU afirmou prioritário a entrega de tecnologias inovadoras, acessíveis e aplicáveis para novos edifícios no sentido de eficiência energética[17]. Pelo final do ano de 2020, todos os novos edifícios têm de respeitar a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios, obrigando-os a atingir níveis de consumo energético praticamente nulo usando soluções inovadoras, eficientes e integradas em energia renovável.

O método mais efetivo na redução de consumo de energia dos edifícios é a incorporação dos materiais mudança de fase (PCM) como um aditivo na construção dos novos edifícios, como no betão, cimento, argamassa ou outros[18]-[21].

3 Estudo experimental

Neste capítulo apresenta-se os resultados de caracterização dos materiais utilizados que constituem a base do sistema modular GEOGREEN, que foram realizados no âmbito deste trabalho.

Ao mesmo tempo, procede-se à caracterização física e química dos materiais utilizados para a produção dos materiais mudança de fase, informação fundamental para uma correta interpretação do seu funcionamento.

Numa segunda fase descreve-se as quantidades de todos os materiais envolvidos, como materiais ativos alcalinamente e materiais de mudança de fase, nas bases GEOGREEN e a sua metodologia para uma correta produção dos mesmos.

Finalmente, procede-se descrição da parte experimental realizada na câmara de ensaios em clima real e os resultados obtidos.

3.1 Caracterização e processamento dos materiais ativados alcalinamente

Seguidamente apresenta-se as características dos materiais utilizados como precursores; nomeadamente lamas residuais das minas da Panasqueira, vidro moído e metacaulino, bem como, os ativadores alcalinos.

3.1.1 Precursores

O precursor principal utilizado para este trabalho de investigação foram as lamas provenientes das minas da Panasqueira mas, conseqüentemente, devido ao grau de amorfismo e à reatividade limitada deste material, recorreu-se a

uma mistura de percussores corrigindo assim essas limitações. Os percussores utilizados, resultando num incremento de reatividade, foram o vidro moído e o metacaulino, dado que o primeiro tem uma estrutura amorfa e o devido à sua finura[22].

3.1.1.1 Lamas residuais

Como referido anteriormente, as lamas residuais utilizadas no presente trabalho são provenientes das minas da Panasqueira. As minas da Panasqueira ou couro mineiro da Panasqueira são minas de tungsténio localizadas no centro de Portugal, a sul da serra da estrela, em parque natural paisagem protegida e próximo do rio Zêzere (Figura 3.1).



Figura 3.1-Localização na região Centro (Google maps, 2016)

As minas da Panasqueira foram um grande impulsionador económico do país durante as grandes guerras. A exploração é iniciada em 1989 tendo o seu pico de exploração sido atingido durante as duas guerras mundiais (1914-1918 e 1939-1945) e a Guerra da Correia (1950-1953), uma vez que o volfrâmio é conhecido endurecedor de aços utilizado no fabrico de armamento, resultando assim um aumento da sua procura. Apesar dessa procura ter diminuído drasticamente, ainda são extraídos anualmente cerca de 30.000 toneladas de lamas residuais, que não têm qualquer tipo de aproveitamento, sendo depositadas em barragens (Figura 3.2).

Neste estudo foi feita uma recolha de lamas que se pretendeu que fosse representativa o mais possível das lamas que são correntemente depositadas nas lagoas. Assim decidiu-se fazer uma recolha de lamas, num total de cerca de 300 kg em 3 zonas distintas, embora todas elas na parte central da lagoa como indicado na Figura 3.3.



Figura 3.2-Barragem de depósito das lamas da mina da Panasqueira



Figura 3.3-Vista aérea das minas da Panasqueira e localização do sítio de recolha das lamas residuais (Google maps, 2016)

Inicialmente as lamas foram secas em estufa durante 24h a 100°C. Posteriormente moídas em moinho de esferas metálicas durante 24h e finalmente peneiradas no peneiro de 250 µm, sendo a sua granulometria abaixo desse valor (Figura 3.4). Quanto mais fino forem as lamas maior é a sua reatividade com os ativadores.

3.1.1.2 Vidro moído

O vidro foi obtido através da reciclagem de garrafas de vidro de variadas cores. Foram lhe retirados os rótulos, cola e posteriormente a secagem durante 24h a 60°C. Após a secagem foram partidas e colocadas no moinho de esferas metálicas durante 24h obtendo-se um material fino e homogéneo. Por fim, o vidro moído (Figura 3.5) foi peneirado no peneiro de 125 µm.

3.1.1.3 Metacaulino

O metacaulino foi produzido pela BASF. Trata-se do produto MASTERLIFE MK 828, obtido a partir de uma pozolana natural muito fina que cumpre os requisitos da Norma ASTM C 618 para utilização como aditivo mineral no betão, da classe N(Figura 3.6).

Tabela 3.1- Características físicas do Metacaulino MASTERLIFE MK828

Características físicas do Metacaulino MASTERLIFE MK 828	
Peso volúmico	2,4 g/cm ³
Superfície específica	17m ² /g
Quantidade de pozolana	1100 mg Ca(OH) ₂ /g
Distribuição granulométrica	95% inferior a 80 µm

Tabela 3.2- Composição química do Metacaulino MASTERLIFE MK 828

Composição química do Metacaulino MASTERLIFE MK 828	
SiO₂ : 55%	Fe₂O₃ : 1,4%
Al₂O₃ : 40%	TiO₂ : 1,5%
K₂O + Na₂O : 0,8%	CaO + MgO : 0,3%



Figura 3.4- Lamas residuais das minas da Panasqueira



Figura 3.5- Vidro Moído



Figura 3.6-Metacaulino

3.1.2 Ativadores

As misturas com materiais ativados alcalinamente foram produzidas com um ativador composto (silicato e hidróxido de Sódio), pois em relação aos ativadores simples a reação dá-se mais rápido devido a conterem uma maior quantidade de sílica, o que origina um material de melhores características[23].

3.1.2.1 Silicato de Sódio

O silicato de sódio é produzido através da fusão da areia siliciosa (SiO_2) com carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou potássio (K_2CO_3) entre os 1100 e 1200°C e, onde o vidro resultante é dissolvido com vapor de alta pressão, formando um líquido transparente viscoso. A utilização do silicato de sódio é devida à insuficiente quantidade de sílica presente nos precursores para a ocorrência da geopolimerização [24].

O silicato de Sódio utilizado possui a designação de D40, com aparência transparente viscosa e com a seguinte composição química:

Tabela 3.3- Composição química do silicato de sódio em percentagem elementar

Composto	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
Percentagem (%)	27,3 a 28,3	8,2 a 8,6	<0,4

3.1.2.2 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio tem um papel muito importante na solução utilizada de ativador. A sua combinação com o silicato de sódio faz com que forme um ativador alcalino muito eficaz, compensando a carga elétrica dos aluminatos e também ajudar no processo de dissolução dos aluminossilicatos pelo aumento do pH.

a) Produção das soluções de Hidróxido de sódio em laboratório

Foram realizadas soluções com a quantidade de NaOH com um grau de pureza de 97,5%, sendo obtido através das seguintes equações:

$$C = \frac{n}{v} \leftrightarrow n = C * V \quad (3.1)$$

$$n = \frac{m}{M} \leftrightarrow m = n * M \quad (3.2)$$

Foi utilizado volumétrico de volume (V) de 0,5 dm³ para cada uma das concentrações. A massa molar (M) de NaOH considerou-se 40g/mol, deste modo para uma concentração (C) de 10 M obteve-se:

$$C = \frac{n}{v} \leftrightarrow n = 10 * 5 = 5 \text{ mol de NaOH} \quad (3.3)$$

$$n = \frac{m}{M} \leftrightarrow m = 5 * 40 = 200 \text{ g de NaOH} \quad (3.4)$$

Sendo a pureza de NaOH de 97,7%, obteve-se 205,12 g de NaOH para um volume de 500ml e uma concentração de 10 M.

Seguidamente foi colocado o NaOH juntamente com cerca de 400 mL de água desmineralizada num *gobelet* com um agitador magnético, ligou-se o misturador até o hidróxido estar totalmente dissolvido. Em seguida colocou-se a solução num balão volumétrico e acabou-se por adicionar os mL de água destilada necessários para preencher o balão volumétrico de 500mL.

3.1.3 Moagem

Para utilização das lamas residuais e do vidro, utilizou-se o moinho, denominado de Los Angeles (Figura 3.8) com bolas metálicas no seu interior (Figura 3.7). Este fez com que se obtivesse uma maior finura das lamas residuais. A moagem do vidro é iniciada com a limpeza de todas as garrafas, como retirada dos rótulos, colas e qualquer material não vítreos, seguindo-se da secagem das mesmas. Após o vidro estar devidamente seco, as garrafas são quebradas e inseridas dentro do moinho, juntamente com as bolas metálicas. Optou-se por uma duração de moagem de 24h, sendo que quanto maior for o ciclo de moagem menor será a dimensão média das partículas.



Figura 3.8-Ensaio de Los Angeles

O ensaio Los Angeles é essencialmente utilizado em indústria do cimento, dos metais não ferrosos, do vidro e cerâmica. É caracterizado por um dispositivo tubular oco rotativo e revestido a Neopreno.

3.1.4 Peneiração

A fim de reduzir a granulometria e obter um material mais homogêneo, aumentar a sua superfície específica e reatividade para o processo de geopolimerização, todas as lamas residuais, vidro moído e pó de granito passaram pelo processo de peneiração. A peneiração foi realizada através de peneiros ISO[25], previamente limpos. Todos os materiais descritos anteriormente foram peneirados recorrendo a vibração mecânica (Figura 3.9), sendo que o vidro moído e as lamas utilizadas foram aquelas que passaram o peneiro de 250 μm . Já o pó de granito, utilizado no revestimento dos materiais mudança de fase, foi utilizado o que passou no peneiro de 500 μm . Estes materiais foram previamente secos em estufa a 60°C durante 24h.



Figura 3.9-Peneiração mecânica

3.1.5 Composição química

As composições químicas das lamas residuais e vidro moído foram determinadas por SEM/EDX (energia dispersa de Raio-X) através do microscópio eletrônico Hitachi S-3400N. O ensaio consiste na excitação dos elétrons externos dos átomos e os íons constituintes na amostra, mudando-os de nível energético, devido a uma incidência sobre essa mesma amostra um feixe de elétrons. Ao voltarem a posição normal é libertada a energia adquirida e é emitida em forma de comprimento de onda pelo espectro raio-X, sendo assim medida a energia associada a cada elétron. Desta forma, sabendo que os elétrons dos átomos possuem energias diferentes, é possível determinar os diferentes elementos químicos constituintes na amostra e assim definir a composição química do material[26].

Nas seguintes tabelas (Tabela 3.4, Tabela 3.5), apresenta-se a composição elementar das amostras de lamas residuais e vidro moído.

Tabela 3.4-Composição química de óxidos das lamas, vidro moído e metacaulino

Amostras	Lamas residuais	Vidro moído	Metacaulino
Óxido	%	%	%
Al ₂ O ₃	17,49	2,59	20,36
SiO ₂	41,52	62,53	57,77
SO ₃	8,17	-	0,33
K ₂ O	3,98	0,75	2,44
CaO	0,74	10,55	1,82
TiO ₂	0,63	-	0,67
Fe ₂ O ₃	12,46	0,82	-
ZnO	0,72	-	-
P ₂ O ₅	0,32	-	-
Na ₂ O	-	14,72	1,10
MgO	-	2,43	0,65

Verifica-se que a sílica e a alumina são os óxidos mais representados nas lamas. A sílica e a alumina são óxidos fundamentais para que exista o processo de ativação alcalina, o que as torna um bom material precursor.

O vidro moído é constituído essencialmente por sílica, cal e óxido de sódio na sua composição de óxidos. Sendo a sílica, uma vez mais, um composto fundamental para a ativação alcalina e o óxido de sódio também favorável a este processo químico.

O metacaulino apresenta essencialmente sílica e alumina na sua composição de óxidos, contendo também uma pequena percentagem de cal. Neste caso o metacaulino tem uma elevada reatividade dada a sua elevada finura, tratando-se de um metacaulino fornecido pela BASF, como já foi referido anteriormente.

Tabela 3.5-Composição elementar das lamas e do vidro moído

Amostras	Lamas residuais	Vidro moído
Elemento	%	%
O	45,05	42,17
Al	10,31	1,45
Si	21,61	30,97
K	3,68	0,66
Ca	0,59	7,99
Ti	0,42	-
Fe	9,71	0,0,6
Zn	0,65	-
As	4,18	-
P	0,16	14,72
Mg	-	1,55
Na	-	11,57

3.1.6 Análise granulométrica por difração laser

Para a análise de distribuição de tamanho de partículas das lamas residuais, vidro moído e metacaulino utilizou-se a granulometria por difração a laser; modelo Beckman Coulter. O ensaio consiste na determinação do tamanho das partículas por uma difração a laser; as partículas entram em movimento num fluido em que elas são dispersas causando descontinuidades no fluxo. Neste processo há uma incidência de luz que é correlacionada com o tamanho das partículas. O princípio do método diz que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. A distribuição de tamanho de partícula é obtida por cálculo matemático baseado em sensores que medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada.

Nas figuras seguintes pode-se observar a distribuição volumétrica das partículas das lamas residuais, vidro moído e metacaulino (Figura 3-10, Figura 3.11, Figura 3.12).

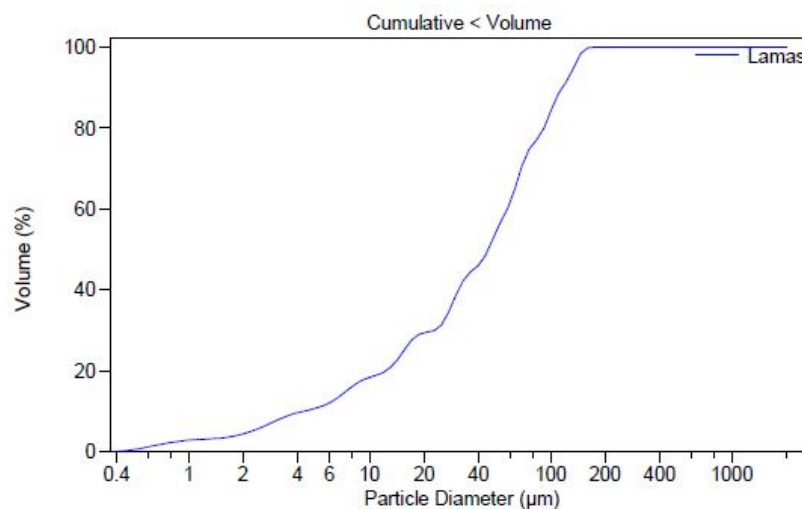


Figura 3-10- Análise granulométrica das lamas residuais

Na Figura 3-10 pode observar-se que a dimensão média das partículas das lamas residuais é de 47,3 µm.

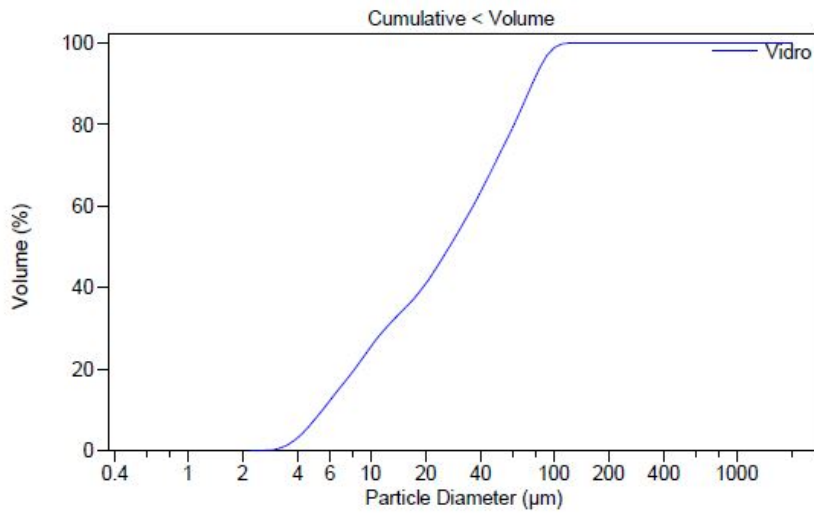


Figura 3.11- Análise granulométrica do vidro moído

Na Figura 3.11 pode observar-se que a dimensão média das partículas do vidro moído é de 39.1 µm.

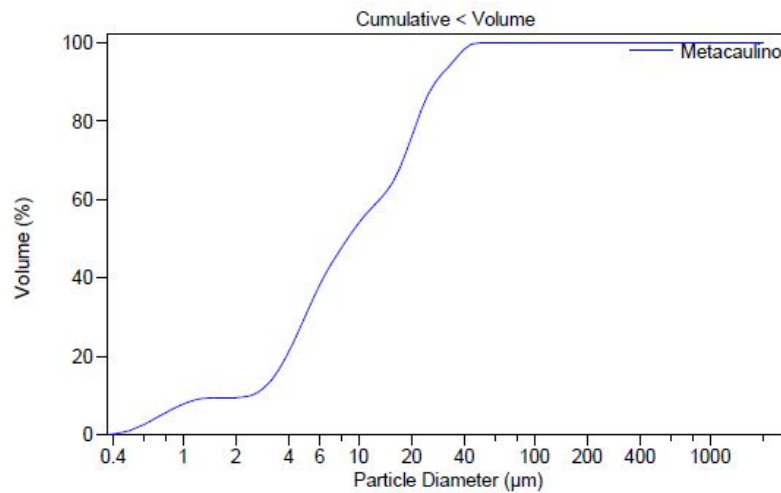


Figura 3.12-Análise granulométrica do metacaulino

Na Figura 3-10 pode observar-se que a dimensão média das partículas das lamas residuais é de 12,7 µm.

3.2 Caracterização e processamento das bases do sistema GEOGREEN com PCM

Seguidamente apresenta-se as características dos materiais utilizados na produção dos agregados com PCM, bem como a descrição do seu processo de produção. É também apresentado o processo de produção das bases modulares GEOGREEN com PCM e todas as suas quantidades..

3.2.1 Argila expandida

A argila expandida é produzida pela queima de argila natural, em forno rotativo, a temperaturas de 1100-1200°C. É um material cerâmico leve com núcleo alveolar e possui um formato arredondado (Figura 3.13). Este material foi fornecido em sacos de +/-50L pela Argex - Argila Expandida, S.A, localizada no concelho de Oliveira do Bairro.



Figura 3.13-Aspecto da argila expandida ARGEX

A argila expandida é essencialmente utilizada no sector da construção, no isolamento e regularização de pisos, drenagem de solos, entre outros. A argila expandida que nos foi fornecida tem as seguintes características apresentadas na Tabela 3.6:

Tabela 3.6- Características da argila expandida ARGEX

Características técnicas	
Classes granulométricas reais	4,0-8,0 mm
Densidade aparente seca (+/- 15%)	358 Kg/m ³
Resistência ao esmagamento (+/- 10%)	4,8 MPa
Forma da partícula	Agregado leve de argila de forma arredondada
Resistência ao fogo	Incombustível Euro Classe A1

3.2.2 Material mudança de fase (PCM)

Como material mudança de fase foi utilizada a parafina RUBITHERM RT. Trata-se de um puro material mudança de fase. Este material armazena calor utilizando os processos mudança de fase entre sólido e líquido (fusão e solidificação) para armazenar e liberta grandes quantidades de energia térmica a temperatura aproximadamente constante[27].

A parafina utilizada tem as seguintes características:

Tabela 3.7- Características da parafina RT 25 HC

Caraterísticas da parafina RT 25 HC	
Temperatura de fusão	22-26 °C
Temperatura de Solidificação	26-22 °C
Capacidade de armazenamento de calor +/- 7,5%	230 kJ/kg
Capacidade específica de calor	2 kJ/kg*k
Densidade sólida (a 15 °C)	0,88 kg/l
Densidade líquida (a 40 °C)	0,77 kg/l
Condutibilidade de calor (ambas as fases)	0,2 W/(m*k)
Expansão volumétrica	12,5 %
Máxima temperatura de operação	65 °C

3.2.3 Resina, Catalisador e acelerador

A resina poliéster utilizada foi a PALATAL P4-01 com a adição de catalisador MEK V-50 e acelerador Octobalto de Cobalto. Para a produção desta resina utilizaram-se as seguintes quantidades para uma massa de 250 g de argila expandida:

Tabela 3.8-Quantidade dos elementos constituintes para a resina final para 250 g de argila expandida

Quantidade	Resina	Acelerador	Catalisador
(%)	100	1	3
(g)	50	1	1,5

A resina PLATAL P4-01 é uma resina poliéster baseada em glicóis de ácidos e ortoftálico padrão, dissolvido em estireno. É recomendada para a produção de geopolímeros, pedra artificial, entre outros[28]. A Tabela 3.9 apresenta as características desta resina:

Tabela 3.9-Características da resina PALATAL P4-01

Características da resina PALATAL P4-01	
Aparência	Clara
Viscosidade (a 23°C)	540 - 610 mPa*s
Tempo de cura (dos 25 aos 35°C)	16 - 21 min
Densidade (a 20°C)	1100 kg/m ³
Resistência à tração	70 MPa
Resistência à flexão	110 MPa

O catalisador MEK V-50 é peróxido de metil-etil-cetona a 50% em dimetilftalato. Indicador de cura de resinas poliéster pré e não aceleradas à temperatura ambiente. Não deve ser colocado em contato direto com o acelerador de cobalto, pois resultará em violenta decomposição e possível explosão[29].

O acelerador de Cobalto é um acelerador para resinas poliéster em geral não-aceleradas. Usado em conjunto com o catalisador MEK V-50 (peróxido de metil-etil-cetona)[29].

3.2.4 Pó de Granito

O pó de granito utilizado para envolvimento da argila expandida saturada de parafina é resultante do corte de blocos graníticos do Granito Cinza Pinhel. Este granito apresenta cristais de feldspato disperso bem desenvolvidos e encraves biotíticos de tamanho variável. Este material foi fornecido por CUBIGRANI localizada no concelho de Pinhel. A Tabela 3.10 apresenta as características referentes a este tipo de granito:

Tabela 3.10- Características Físico-Mecânicas do Granito Cinza Pinhel

Características Físico-Mecânicas - Granito Cinza Pinhel	
Resistência mecânica à compressão	1134 Kg/cm ²
Resistência mecânica à flexão	105 Kg/cm ²
Massa volúmica aparente	2628 Kg/m ³
Absorção de água à P.At. N.	0,28%
Coefficiente de dilatação linear térmica	7,2 ⁻⁶ por °C
Resistência ao desgaste	0,3 mm

Na produção do agregado artificial com PCM, utilizou-se o pó de granito com uma granulometria inferior a 500 µm.

3.2.5 Processo de fabrico dos agregados artificiais com PCM

A produção dos agregados artificiais com PCM tem um grau de dificuldade elevado, já que para utilizarmos a parafina ela precisa de estar no seu estado

líquido. A solução encontrada foi trabalhar num ambiente com temperatura controlada superior a 25°C.

A impregnação do PCM na argila expandida obedeceu a uma metodologia previamente estudada. Esta metodologia está dividida em quatro fases, o pré-condicionamento de todo o material, impregnação a vácuo da argila expandida, secagem da superfície e revestimento[2].

a) Metodologia para produção de 250 g de argila expandida seca com PCM:

- Colocar a argila expandida com uma granulometria de 4mm a 8mm numa estufa a 105°C durante 24h
- Pesar 250 g de argila expandida seca
- Colocar a câmara a uma temperatura superior a 25°C
- Encher com parafina líquida o depósito de PCM
- Colocar a argila expandida no exsiccador, colocar o tampo de cerâmica perfurado por cima e selar bem com vedante
- Ligar a bomba de vácuo e deixar atingir -800mBar
- Deixar estar a fazer vácuo durante 30 minutos
- Fechar a válvula da bomba de vácuo e verificar se mantém os -800 mBar
- Abrir a válvula do depósito com PCM até encher o exsiccador acima do tampo de cerâmica perfurado
- Fechar a válvula do depósito de PCM e abrir a válvula de saída de pressão para deixar o exsiccador estabilizar durante 15 minutos
- Colocar a argila expandida saturada a escorrer durante 5 minutos
- Secar a superfície num tabuleiro com papel absorvente
- Pesar 50 g de Resina
- Pesar 1 g de acelerador
- Pesar 1,5 g de catalisador
- Num copo misturar a resina, o acelerador e o catalisador até ficar com uma cor homogénea (quantidades indicadas no ponto 3.1.3)

- Envolver num tabuleiro, com a ajuda de uma espátula, a argila expandida saturada com a mistura de resina, acelerador e catalisador até estarem todas bem envolvidas.
- Colocar uma 2 Kg de pó de granito num balde com tampa juntamente com a argila saturada e envolvida em resina, tapar o balde e mexer até ficarem totalmente revestidas
- Se necessário repetir o passo anterior para um melhor revestimento

A Figura 3.15 e a Figura 3.15 demonstra o aparelho de impregnação utilizado e todos os seus constituintes

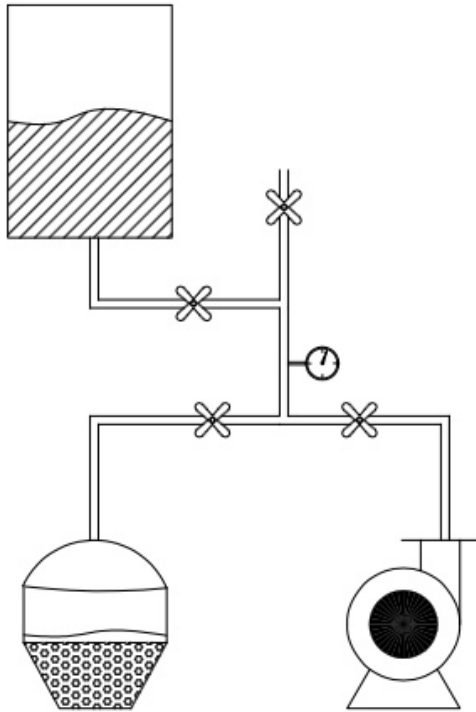


Figura 3.14-Esquema do sistema de impregnação

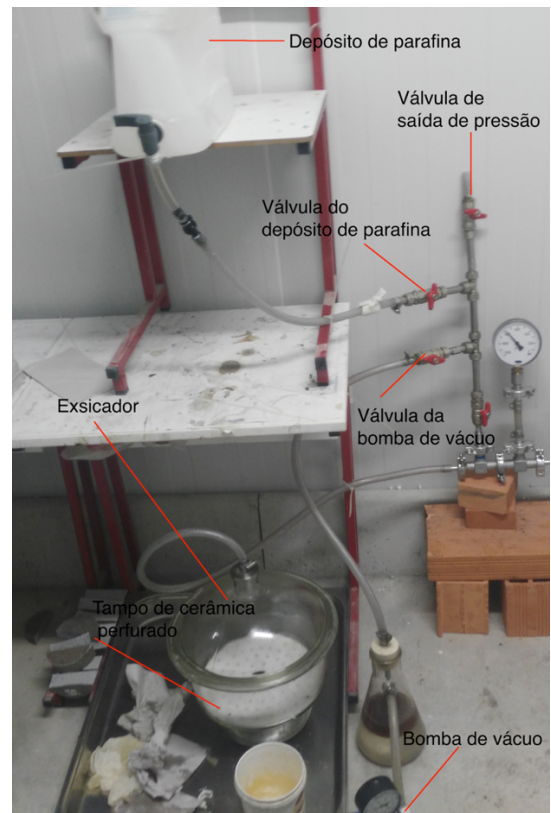


Figura 3.15-Sistema de impregnação



Figura 3.16-Produto final de argila dos agregados artificiais com PCM

3.2.6 Produção das bases do sistema GEOGREEN com PCM

A produção da peça modular requer cuidados de forma a possuir as características desejadas. Este processo é dividido em duas fases: a produção da base do GEOGREEN com materiais artificiais com PCM e a colagem da mesma aos alvéolos de aglomerado de cortiça. Deste modo, a metodologia é exemplificada de forma sintetizada.

Produção e colagem de uma base unitária - Quantidades e metodologia:

As quantidades apresentadas baseiam-se no volume de 1 molde ($V=1900\text{cm}^3$)

Tabela 3.11- Quantidade da mistura de precursores e PCM

Quantidade	Lamas residuais	Vidro moído	Metacaulino	Material mudança de fase
(%)	75	8	7	10
(g)	2468,35	263,29	230,37	329,11

Tabela 3.12-Quantidade dos diferentes componentes da mistura

Quantidade	Precursores + PCM	Silicato de Sódio	Hidróxido de Sódio
(%)	100	20	5
(g)	3291,12	658,22	164,56

- Colocar produto desmoldante no molde
- Pesar 2468,35 g de lamas residuais peneiradas
- Pesar 263,29 g de vidro moído peneirado
- Pesar 230,37 g de metacaulino
- Pesar 329,12 g de PCM

- Envolver num recipiente as lamas residuais, vidro moído e metacaulino de forma a serem bem distribuídos
- Pesar 658,22 g de silicato de sódio
- Pesar 164,56 g de hidróxido de sódio
- Envolver numa misturadora o silicato e hidróxido de sódio durante 5 minutos
- Adicionar a mistura de lamas residuais, vidro moído e metacaulino, lentamente à solução de silicato e hidróxido de sódio. Deixar misturar durante 5 minutos
- Adicionar o PCM lentamente e deixar misturar até que fiquem bem distribuídos
- Colocar a mistura no molde e vibrar, com a ajuda de bancada vibratória, até não se libertarem mais bolhas de ar
- Colocar o molde, nivelado no forno durante a 60°C
- Desmoldar após 12 h e deixar arrefecer
- Colar a base por cima dos alvéolos com cola de contacto, e pressionar com a ajuda de algum peso.



Figura 3.17-Base GEOGREEN com materiais mudança de fase

3.2.7 Ensaio da resistência à compressão

Para verificar as propriedades mecânicas da mistura utilizada na produção da base do GEOGREEN, realizaram-se ensaios de resistência à compressão aos corpos de prova aos 28 dias.

Os corpos de prova foram elaborados a quando a produção das bases finais sendo estes cubos de 4cm de aresta. A cura dos corpos de prova foi efetuada com uma temperatura controlada de 60°C, sendo esta a mesma temperatura que as bases curaram.

No ensaio utilizou-se uma prensa hidráulica e um acessório para provetes (Figura 3.18) de dimensões reduzidas de forma a permitir uma correta colocação e posicionamento dos corpos de prova, o que garante uma aplicação precisa de carga.



Figura 3.18-Prensa e dispositivo utilizado no ensaio à compressão

Este ensaio permite avaliar a resistência à compressão dos provetes, mas também identificar se a mistura tem pouca reatividade ou problemas de ativação, devido a apresentarem valores de resistência à compressão. OS

valores obtidos no teste de compressão de 5 provetes são apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13- Resultados dos ensaios de compressão

Provete	Massa (g)	Força de rotura (kN)	Força de rotura Média (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Tensão de rotura Média (MPa)
1	130,2	35,5		22,2	
2	130,1	34,5		21,5	
3	128,5	31,7	34,6	19,8	21,6
4	131,4	37,6		23,5	
5	129,7	33,9		21,2	

3.2.8 Ensaio do comportamento térmico em clima real

Os ensaios de comportamento térmico foram realizados numa célula de testes se encontra nas instalações da Universidade da Beira Interior e também foi utilizada nos testes apresentados no capítulo 3. Esta célula de testes está localizada no último andar de um edifício exterior com características de um vale. A célula está localizada de maneira a não haver projeções de sombras durante todo o dia.

A célula de ensaios tem as características demonstradas na Figura 3.19. Tem 5.10 m de comprimento, 3.10 m de largura, 3.10 m de altura e cada compartimento tem acesso individual. A câmara de ensaios foi totalmente construída com 14cm de painel sandwich de espuma de poliuretano e coberto com placas de ferro pintado de 1 mm. Todas as paredes e aberturas são feitas do mesmo material mas com uma espessura de 10 cm. Foi adicionado uma tira de borracha a cada abertura para evitar qualquer perda térmica. A disposição dos sensores de humidade e temperatura é demonstrado na Figura 3.19. Foi

também adicionado às aberturas, onde vão ocorrer os ensaios, placas de poliestireno extrudido de 20 cm de espessura deixando assim uma abertura para ensaio de 45 cm de altura (Figura 3.20). Por fim, a Figura 3.21 demonstramos as paredes com os módulos GEOGREEN na disposição correta.

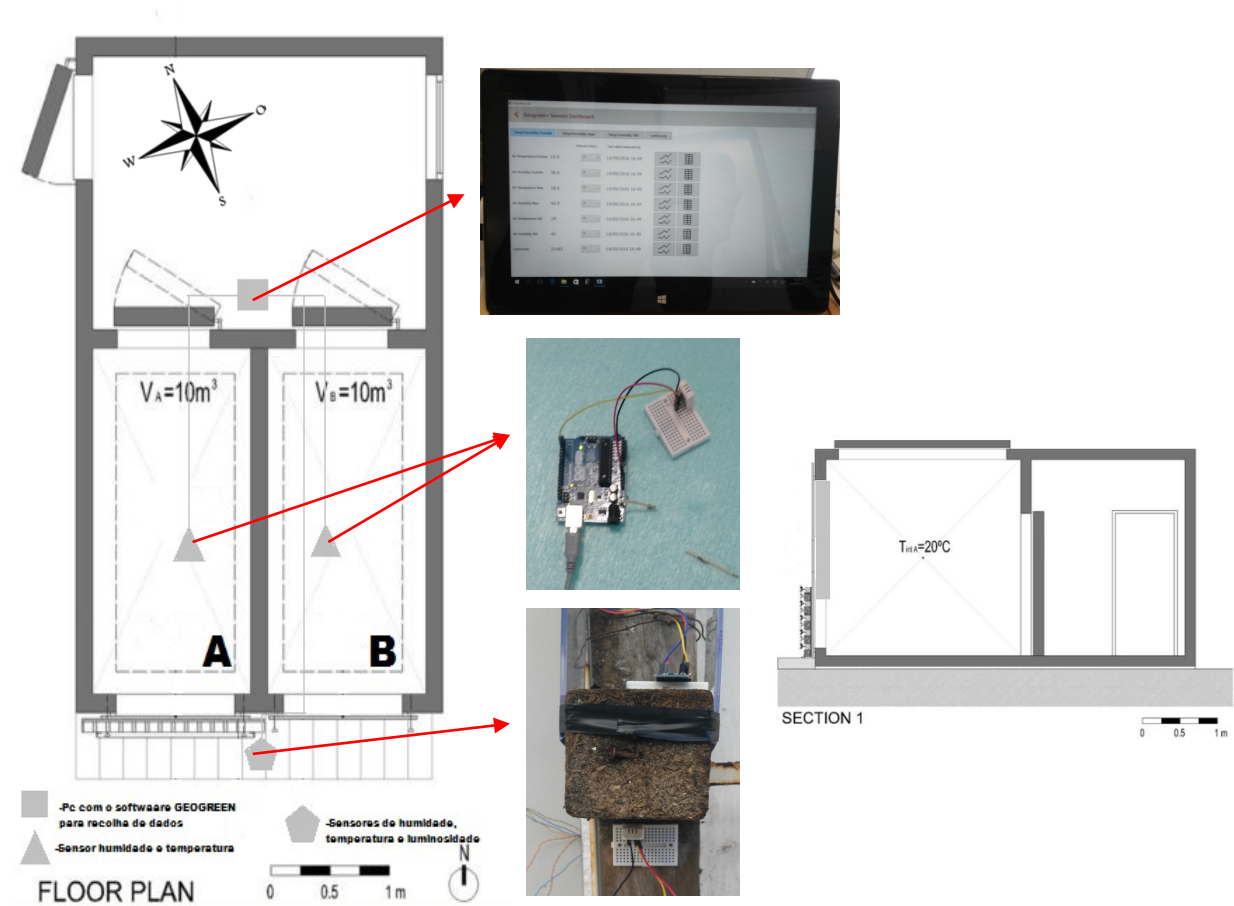


Figura 3.19-Câmara de testes com identificação das câmaras (A e B) e a disposição dos sensores



Figura 3.20-Vista interior de uma câmara com a aplicação do poliestireno extrudido



Figura 3.21-Vista exterior da câmara com os dois tipos de placas GEOGREEN

Os testes foram realizados no mês de Setembro. Os dados foram recolhidos todos os 30 min, quer interiores e exteriores, por sensores programados em Arduíno (Figura 3.23, Figura 3.24) e por sua vez enviados para o *software* denominado GEOGREENPLUS (Figura 3.22) desenvolvido por Luís Almeida.

Inicialmente foram obtidos resultados de temperatura e humidade nos respetivos sensores, tanto no compartimento A como no B, com a parede nua. Posteriormente, a abertura da parede A foi coberta de módulos GEOGREEN simples e a abertura da parede B com módulos GEOGREEN com PCM (Figura 3.21).

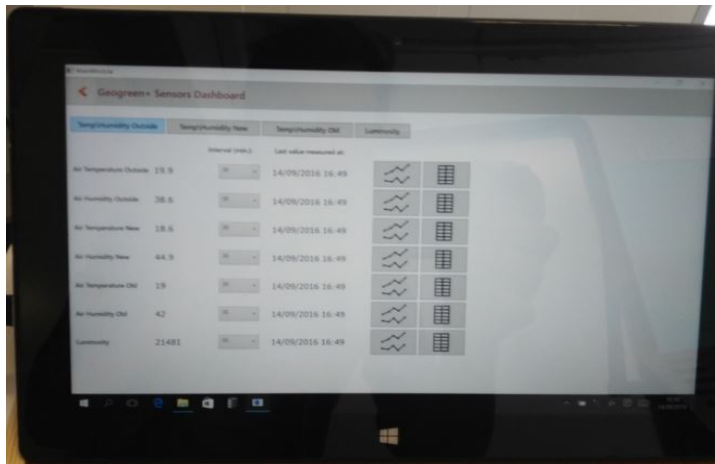


Figura 3.22-Software GEOGREENPLUS em funcionamento

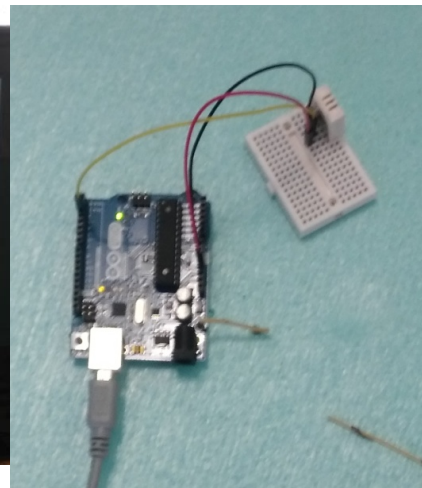


Figura 3.23-Sensor interior de humidade e temperatura conectado à placa Arduino



3.24-Sensor de luminosidade (em cima) e sensor exterior de humidade e temperatura (em baixo)

Procedeu-se à tentativa de calibração dos dois compartimentos, mas, mesmo depois de todo o esforço na preparação da câmara, o compartimento A apresentava valores um pouco diferentes do compartimento B. Esta diferença poderá ser devida pelo compartimento A ter mais exposição solar e/ou ter

alguma pequena abertura possibilitando a entrada e saída de ar. Devido a esta ocorrência os resultados obtidos foram analisados da seguinte maneira:

- Comparou-se as temperaturas e humidades interiores na primeira semana entre a câmara A e B com as paredes nuas;
- Calculou-se o diferencial de temperatura interior e entre câmara B e A com as paredes nuas;
- Comparou-se a temperatura e humidade interiores na segunda semana entre o compartimento A e B, tendo a parede da câmara A sido coberta com o sistema modular GEOGREEN simples e a parede B coberta com o sistema modular GEOGREEN e PCM, e ambos sem substrato e vegetação nas aberturas;
- Obteve-se o diferencial de temperatura interior entre câmara B e A com as paredes cobertas com foi referido no ponto anterior;
- Finalmente comparou-se a câmara B nua com a câmara B com o sistema GEOGREEN e PCM sem substrato e vegetação nas aberturas.

Desta maneira é possível conhecer as diferenças térmicas entre a câmara B e a câmara A cobertas e posteriormente a diferença de temperatura total entre a câmara B coberta com o sistema GEOGREEN com PCM e a parede nua.

Na primeira semana, como foi referido anteriormente, obtiveram-se os seguintes dados da luminosidade, humidade exterior, humidade da câmara A, humidade da câmara B, temperatura exterior, temperatura da câmara A e temperatura da câmara B com as paredes de cada câmaras nuas.

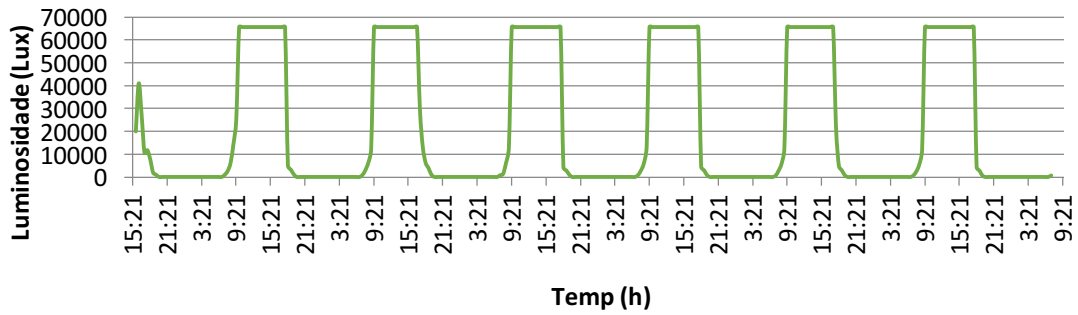


Figura 3.25-Luminosidade (lux) da primeira semana

Verifica-se na Figura 3.26 os ciclos diurnos e noturnos que a câmara de ensaios esteve exposta, sendo que o máximo de luminosidade não foi obtido pelo sensor já que ele é limitado aos 63000 lux.

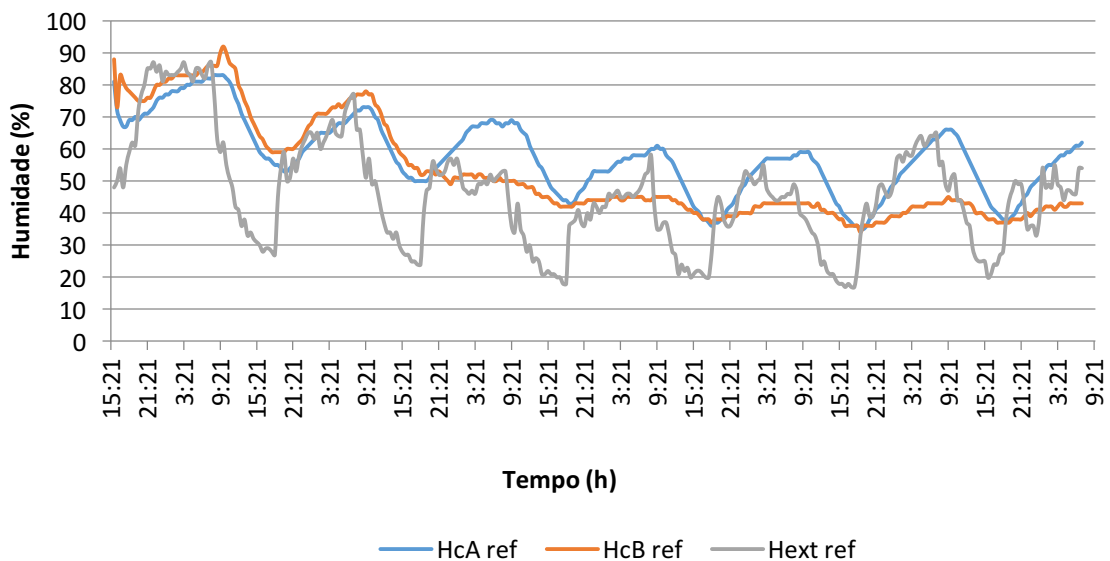


Figura 3.26-Humidade exterior (Hext ref), humidade da câmara A (HcA ref), humidade da câmara B (HcB ref), da primeira semana

Observa-se na Figura 3.26 que a humidade da câmara A continua superior mesmo passados 7 dias de testes, contudo é de notar que ambas iniciam a ter valores constantes nos últimos 3 dias de testes.

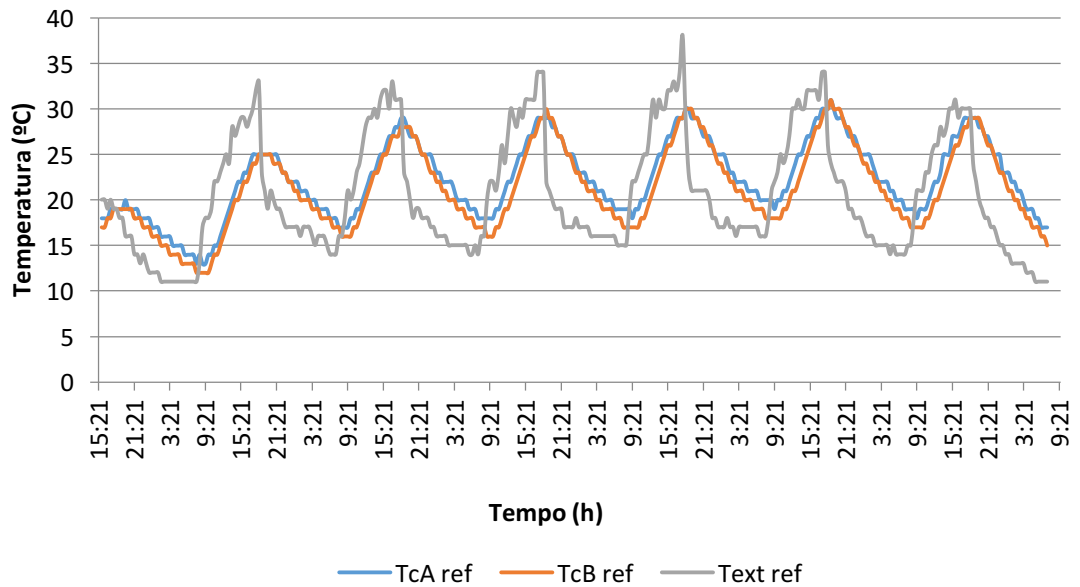


Figura 3.27-Temperatura exterior (Text ref), temperatura da câmara A (TcA ref), temperatura da câmara B (TcB ref), da primeira semana

Na Figura 3.28 é observado que entre a camara A e B, a diferença de temperatura máxima atingida é praticamente 0°C e a mínima atingida varia entre 1°C e 2°C.

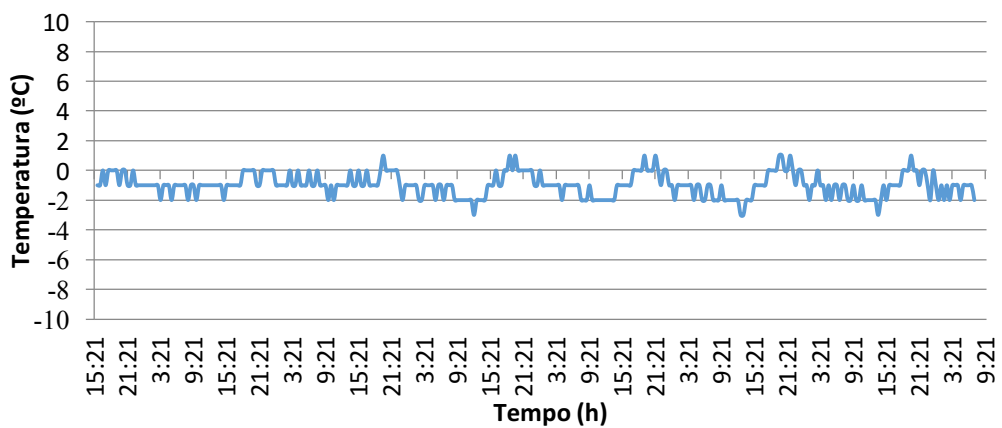


Figura 3.28-Diferencial de temperatura entre a câmara B e a câmara A na primeira semana

Conclui-se com a Figura 3.28 que há uma diferença média entre a câmara B e A de -1°C, ou seja, a câmara B está mais fria 1°C resultado da sua exposição solar.

Na segunda semana recolheram-se os mesmos tipos de dados, mas agora com a câmara A com o sistema modular GEOGREEN simples e a câmara B com o sistema modular GEOGREEN e PCM, ambas sem substrato nas aberturas.

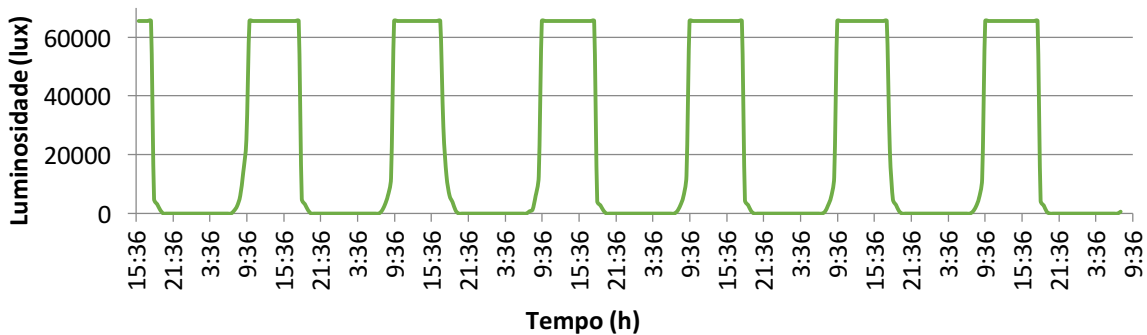


Figura 3.29-Luminosidade (lux) da segunda semana

Observa-se na Figura 3.26 os ciclos diurnos e noturnos que a câmara de ensaios esteve exposta. Como foi referido anteriormente, o valor máximo de luminosidade não foi obtido por limitações do sensor.

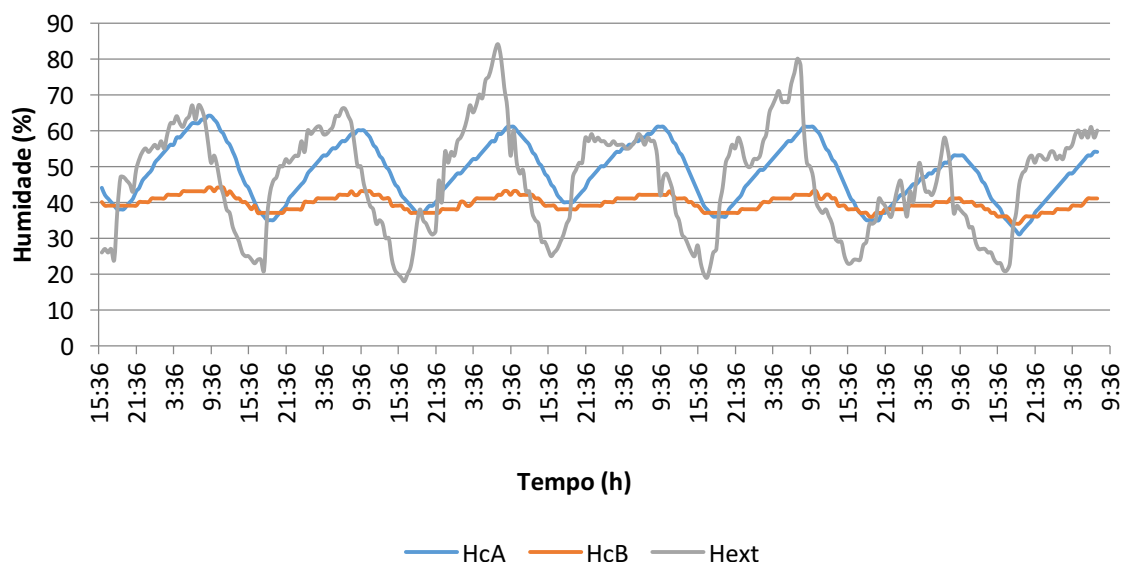


Figura 3.30-Humidade exterior (Hext), humidade da câmara A (HcA) e humidade da câmara B (HcB) durante a segunda semana

Verifica-se que a câmara A tem uma variação média de 20% durante os ciclos diários e a câmara B de 5% de humidade. Estas variações são praticamente constantes durante toda a semana.

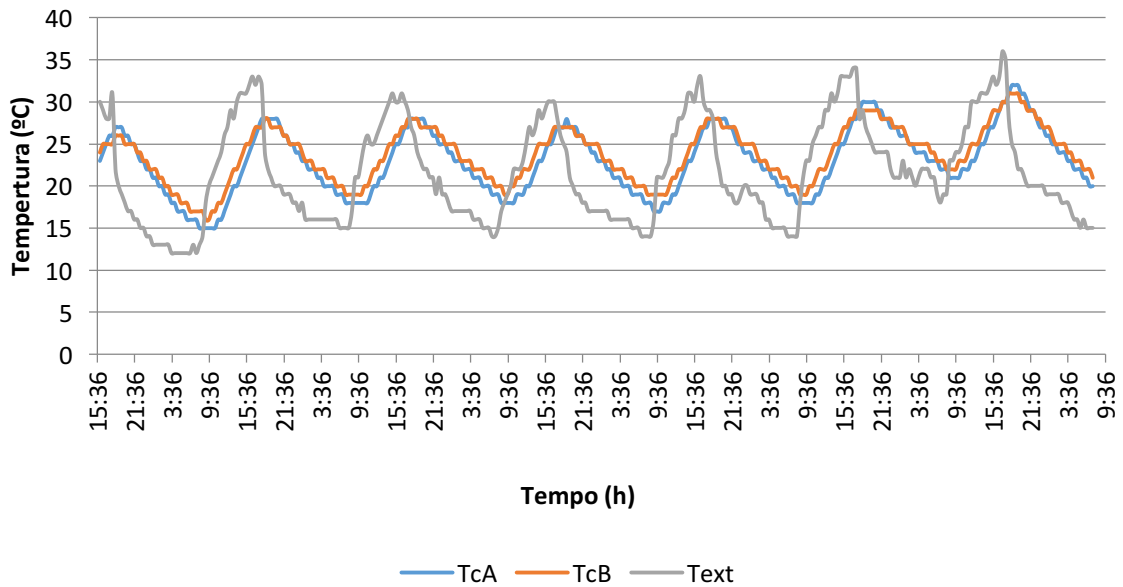


Figura 3.31-Temperatura exterior (Text), temperatura da câmara A (TcA), temperatura da câmara B (TcB) durante a segunda semana

Na Figura 3.31 observa-se que a câmara A (com sistema modular GEOGREEN simples) tem valores máximos de temperatura superiores ao da câmara B (com sistema modular GEOGREEN e PCM), ou seja, durante o dia aquece mais. Durante a noite a Câmara A tem valores de temperatura mínima inferiores ao da câmara B, ou seja, arrefece mais.

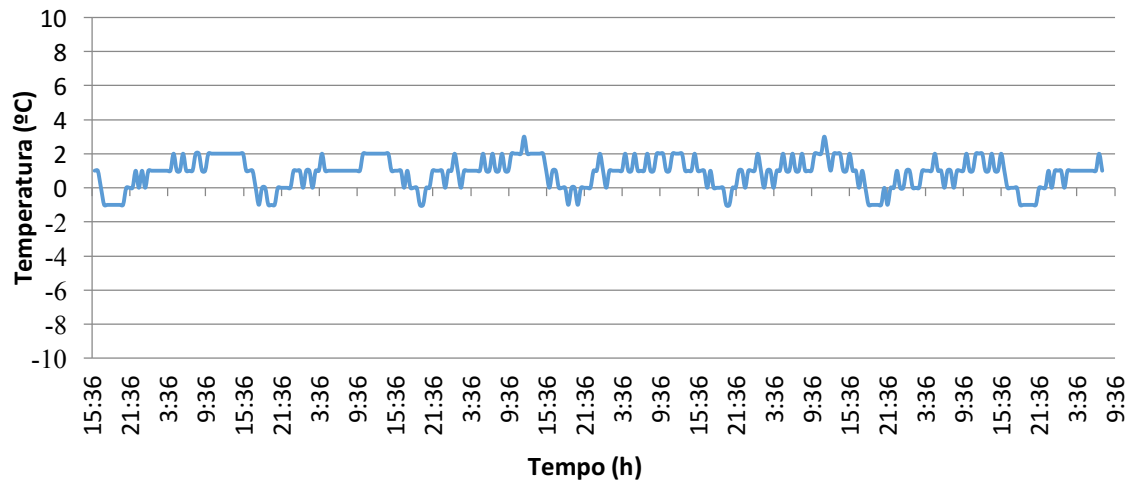


Figura 3.32-Diferencial de temperaturas entre a câmara B e a câmara A na segunda semana

Na Figura 3.28 Observa-se que há uma diferença média entre a câmara B (com sistema modular GEOGREEN simples) e a câmara A (com sistema modular GEOGREEN e PCM) durante o período noturno de +2°C e durante o dia de -1°C. Verifica-se que a parede B é mais eficiente que a parede A.

4 Conclusão e trabalhos futuros

4.1 Considerações finais

Como foi referido inicialmente, este trabalho teve como objetivo principal continuar com estudo no melhoramento do sistema modular GEOGREEN. Este melhoramento resulta na adição de PCM na argamassa de materiais ativadas alcalinamente, formando a base do sistema. Neste trabalho investigou-se a influência da incorporação do PCM no sistema modular na temperatura no interior de células de ensaio num clima mediterrâneo real.

Em relação ao estudo anterior no capítulo 2.4 apresenta-se a seguinte análise:

- Oferece um aumento térmico no período noturno de 4°C e na diurna uma diminuição de 1°C
- Introduce uma diminuição de amplitude térmica de 1°C

No estudo deste trabalho, os resultados obtidos apontam para uma eficácia do sistema GEOGREEN com PCM quando comparado com uma parede nua ou com uma parede GEOGREEN simples. A investigação incidiu sobre a comparação das temperaturas interiores. A partir deste estudo pode concluir-se que para os períodos avaliados, em comparação com a parede nua ou somente com GEOGREEN, o sistema estudado (Figura 4.1):

- Oferece uma proteção térmica adicional com variações de temperatura, mesmo sem substrato e vegetação nas aberturas;
- Introduce um aumento de atenuação das temperaturas interiores quando aplicado sem substrato e vegetação, e essa diferença ser ainda maior quando aplicado somente substrato.
- Durante o período noturno, tem um aumento da temperatura interior em média de +4°C e durante o dia de decréscimo de -1°C, comparado entre

a câmara B com o GEOGREEN com PCM sem substrato e vegetação e a Câmara B nua.

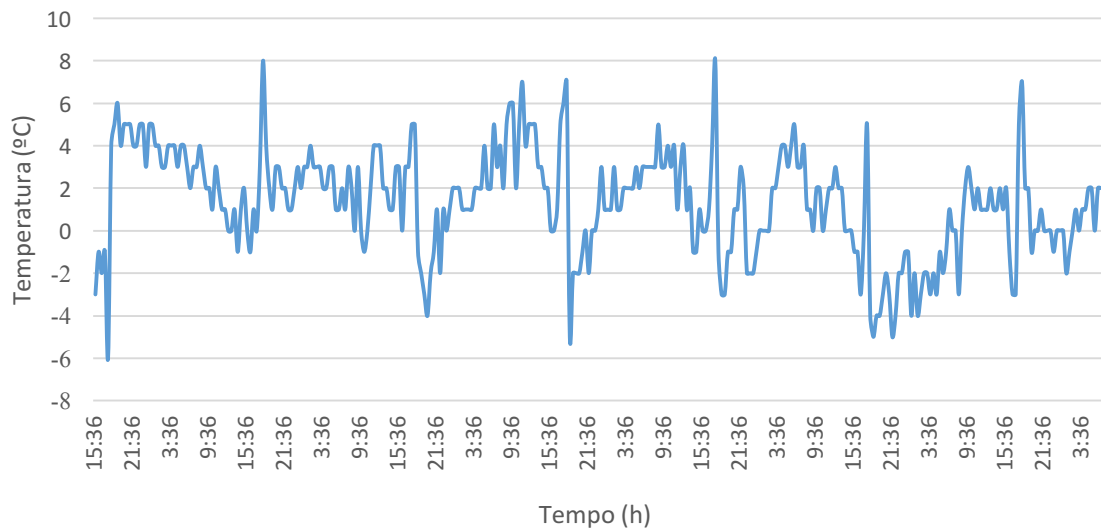


Figura 4.1-Diferencial de temperatura entre a câmara B com o GEOGREEN sem substrato e vegetação e a Câmara B nua.

Conclui-se que esta solução pode contribuir para o melhoramento térmico dos edifícios contribuindo um melhor conforto térmico para os seus ocupantes.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como se foi observando com o decorrer do presente trabalho, há alguns aspetos que podem ser aprofundados, tais como:

- Análise da temperatura interior na célula de ensaios com a parede totalmente coberta com GEOGREEN e PCM
- Análise de fluxos de temperatura na parede
- Utilização de substrato e vegetação nas aberturas do GEOGREEN.

5 Referências bibliográficas

- [1] P. J. Davidovits, “30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs .,” *Geopolymer 2002 Conf.*, pp. 1-16, 2002.
- [2] G. Kastiukas, X. Zhou, and J. Castro-Gomes, “Development and optimisation of phase change material-impregnated lightweight aggregates for geopolymer composites made from aluminosilicate rich mud and milled glass powder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, pp. 201-210, 2016.
- [3] M. Manso and J. Castro Gomes, “Desenvolvimento de um sistema modular de superfícies ajardinadas para a construção e reabilitação de edifícios,” 2013. .
- [4] R. Becker, I. Goldberger, and M. Paciuk, “Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3261-3276, 2007.
- [5] K. Perini, M. Ottelé, E. M. Haas, R. Raiteri, and O. M. Ungers, “Greening the building envelope , façade greening and living wall systems,” *Open J. Ecol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2011.
- [6] Quercus, “Ecocasa- Energia e Clima, Construção Sustentável, Elementos ajardinados.” [Online]. Available: http://ecocasa.pt/construcao_content.php/?id=89. [Accessed: 14-May-2016].
- [7] “SIG Design & Technology British Horse Society use Spectraplan for their green roof,” 2016. [Online]. Available: <http://www.singleply.co.uk/portfolio-items/british-horse-society/#prettyPhoto>.
- [8] M. Manso, A. Virtudes, and J. Castro Gomes, “As superfícies ajardinadas como sistema diferenciador na habitação,” 2013.
- [9] F. Torgal and S. Jalali, “Ligantes obtidos por activação alcalina,” Universidade do Minho.
- [10] A. Purdon, “The action of alkalis on blast furnace slag.” *J Soc Chem Ind*, 1940.
- [11] V. . Glukhovskiy, *Soil Silicates*. 1959.
- [12] J. Davidovits, “Geopolymers: inorganic polymeric new materials,” *J.*

Therm. Anal., vol. 37, no. 8, pp. 1633-1656, Aug. 1991.

- [13] J. Sepúlveda, “Geopolímeros | Engenharia Civil,” 2007. [Online]. Available: <https://engenhariacivil.wordpress.com/2007/07/03/geopolimeros/>.
- [14] M. V. B. Salazar, “Evaporative cooling performance of alkali-activated tungsten mine waste mud mortars,” Universidade da Beira interior, 2011.
- [15] M. Manso and J. P. Castro-Gomes, “Thermal analysis of a new modular system for green walls,” *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 53-62, 2016.
- [16] M. Manso and J. P. Castro-Gomes, “Thermal analysis of a new modular system for green walls,” *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 53-62, 2016.
- [17] European Commission, “Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 10. Secure, clean and energy efficient Revised,” vol. 2015, no. April, 2015.
- [18] R. Shadnia, L. Zhang, and P. Li, “Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, pp. 95-102, 2015.
- [19] A. Eddhahak-Ouni, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, and S. Care, “Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs),” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 64, no. 1-2, pp. 32-39, 2014.
- [20] M. Kheradmand, M. Azenha, J. L. B. De Aguiar, and K. J. Krakowiak, “Thermal behavior of cement based plastering mortar containing hybrid microencapsulated phase change materials,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 526-536, 2014.
- [21] D. Feldman, D. Banu, and D. W. Hawes, “Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 36, no. 2, pp. 147-157, 1995.
- [22] A. Pinto, “Introdução ao Estudo dos Geopolímeros,” 2006.
- [23] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, and M. W. Grutzeck, “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 7, pp. 997-1004, 1999.
- [24] F. Pacheco-Torgal, J. P. Castro Gomes, and S. Jalali, “Estudos Sobre a Composição de Argamassas Obtidas Através da Ativação Alcalina de Lamas Residuais de Minas,” 2007.
- [25] S. Methods and S. Media, “Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves 1,” no. 1, pp. 1-9, 2013.
- [26] K. L. Scrivener, “Backscattered electron imaging of cementitious

microstructures: Understanding and quantification,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 8, pp. 935-945, 2004.

- [27] Rubitherm, “Parafin RT25HC.” [Online]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT25HC_EN_29062016.PDF. [Accessed: 03-May-2016].
- [28] aliancys, “Palatal P4-01 product data sheet.” [Online]. Available: <http://static.aliancys.com/products/palatalr-p-4-01/010482.pdf>. [Accessed: 03-May-2016].
- [29] Fiberglass, “Fibra de vidro e Resina - VI Fiberglass.” [Online]. Available: http://www.vifiber.com.br/Html/prod_aceleradores1.asp.