



Bruno Filipe Santos Pires

DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAL PARA ISOLAMENTO TÉRMICO A PARTIR DE RESÍDUO AGROFLORESTAL E MICÉLIO DE FUNGO

DEVELOPMENT A BIOMATERIAL FOR THERMIC INSULATION BY
USING AGROFORESTRY WASTE AND FUNGAL MYCELIUM

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias e pela Professor Doutora Anabela Marisa Azul

Coimbra, Fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Bruno Filipe Santos Pires

Desenvolvimento de Biomaterial para Isolamento Térmico a partir de Resíduo Agroflorestal e Micélio de Fungo

Development a Biomaterial for Thermic Insulation by using Agroforestry Waste and Fungal Mycelium

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil , na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias e pela Professor Doutora Anabela Marisa Azul

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 3 de Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, Professor Alfredo Dias, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e Professora Anabela Marisa Azul, Instituto de Investigação Interdisciplinar, e Centro de Neurociências e Biologia Celular da Universidade de Coimbra, pela partilha de conhecimentos, orientação e apoio, o que contribuiu de maneira significativa para a realização deste trabalho.

Agradeço ao SerQ, ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e aos seus elementos por todo o apoio e espaço necessário à realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos universitários, Ângelo Branco, Bruno Pinheiro, Ivo Serra, João Sousa e Licas que me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

Agradeço aos meus amigos de sempre e para sempre, Ana Rita, Gonçalo Rodrigues, Mauro Pires, Marcelo Ferreira, Rui Martins, Tiago Brásio e Valter Ferreira por todo o vosso apoio na minha vida.

Agradeço à minha família, em especial ao meu pai, a minha mãe e irmão, por todo o apoio, educação, conhecimento, que permitiu acabar esta etapa da minha vida.

RESUMO

A eficiência energética no setor da indústria assume cada vez mais interesse quer seja pela via da redução de perdas, nomeadamente no isolamento de edifícios, quer pela via da redução da energia incorporada nos produtos, por exemplo nos processos produtivos menos intensivos no uso de energia. As soluções de isolamento que predominam no mercado recorrem com frequência a produtos químicos com elevado consumo energético, obtidos maioritariamente a partir de fontes não renováveis.

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um biomaterial para isolamento térmico a partir da reutilização de resíduos agroflorestais e micélio de fungo. Pretende-se com este biomaterial criar uma alternativa de elevada eficiência energética.

O desenvolvimento do biomaterial envolveu o trabalho assente numa metodologia a partir da investigação em estruturas da madeira e na biologia dos fungos, suportada por uma revisão crítica da bibliografia.

Numa primeira fase, o estudo envolveu a seleção dos constituintes orgânicos, e aditivos, para o substrato modificado a partir de resíduos agroflorestais e o fungo *Pleurotus ostreatus*, com os critérios: i) eficácia do processo e ii) características térmicas desejadas, para o biomaterial em desenvolvimento.

A caracterização do biomaterial foi realizada através de técnicas de imagem no final do processo. A avaliação da condutividade térmica do biomaterial foi efetuada com o sensor *HotDisk*. Os resultados são analisados, tendo por base a aferição do substrato e os testes analíticos. No final é discutido o desenvolvimento de biomateriais desta tipologia para o mercado.

ABSTRACT

Energy Efficiency in the industrial sector becomes increasingly adopted, by losses reduction processes, namely in the buildings insulation, and by embodied energy reduction in products, for example in the less intensive production processes in energy use. The insulation solutions dominating on the market are characterized by the use of chemicals with high energy consumption, mainly obtained from non-renewable sources. This work aims at developing a biomaterial by using agroforestry waste and mycelium in order study a highly energy efficiency alternative material to products already existing on the market.

The development of the biomaterial in this work, involved the research conducted on wood structures and fungal biology, supported by a critical review of the bibliography.

The work started with a selection of organic materials and additives to the modified substrate, namely the agroforestry wastes and the fungal species: *Pleurotus ostreatus*. The main criteria for the selection include the: i) process efficacy and ii) desired thermic insulation characteristics for the developing biomaterial.

The biomaterial characterization was performed through imaging techniques at the end of the growth process. The thermic conductivity assessments were performed with a HotDisk sensor. The results were analysed based on optimized substrate solution and analytical tests. Finally, results are discussed in the context of similar biomaterials development processes for the market.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
ABREVIATURAS	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2 ESTADO DE ARTE.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 ENERGIA.....	5
2.2.1 Consumo energético	5
2.2.2 Ciclo de vida.....	8
2.2.3 Energia incorporada nos materiais e energia operacional	9
2.2.4 Isolamento térmico	9
2.2.5 Isolamentos térmicos à base de materiais naturais e de resíduos	13
3 BIOMATERIAL.....	15
3.1 INTRODUÇÃO	15
3.2 SUBSTRATO MODIFICADO	15
3.3 SUBSTRATO MODIFICADO: MADEIRA & DERIVADOS	17
3.3.1 Resíduos da madeira.....	17
3.3.2 Casca de arroz.....	19
3.3.3 Aditivos	19
3.4 SUBSTRATO MODIFICADO: MICÉLIO DE FUNGOS	20
3.4.1 Estrutura dos fungos	20
3.4.2 Crescimento dos fungos	21
3.4.3 Nutrição	22
3.4.4 Fungo como elemento de ligação do substrato modificado	23
3.4.5 Fungos que decompõem a madeira	24

3.4.6 Espécie selecionada: <i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P. Kumm.....	24
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 INTRODUÇÃO.....	26
4.2 PROCEDIMENTO DE DESENVOLVIMENTO DO BIOMATERIAL.....	26
4.2.1 Composição do substrato modificado	26
4.2.2 Esterilização do substrato	30
4.2.3 Preparação do substrato	31
4.2.4 Inoculação do fungo	32
4.2.5 Inativação do fungo	33
4.3 OPTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS	33
4.3.1 Aferição do substrato.....	36
4.3.2 Alteração do método de inoculação do fungo	37
4.3.3 Alteração do método de inativação do fungo	38
5 TESTES ANALÍTICOS	40
5.1 INTRODUÇÃO.....	40
5.2 ANÁLISE DO CRESCIMENTO DO MICÉLIO.....	40
5.2.1 Aquisição e processamento de imagem.....	41
5.2.2 Aquisição de dados	44
5.3 MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA	45
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
6.1 INTRODUÇÃO.....	50
6.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	50
6.2.1 Medição do crescimento do micélio.....	50
6.2.2 Medição da condutividade térmica.....	53
6.3 DEGRADAÇÃO DO FUNGO/SUBSTRATO	55
6.4 RESULTADOS FINAIS	58
7 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A – Substratos.....	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Total de emissões de CO₂ nos anos de 1973 e 2013 (adaptado de IEA, 2015).</i>	6
<i>Figura 2.2. Energia final consumida no Mundo nos anos de 1973 e 2013 (adaptado de IEA, 2015).</i>	6
<i>Figura 2.3. Energia consumida final por sector na UE, em 2013 (% de tonelada de petróleo equivalente) (adaptado de Eurostat, 2016).</i>	7
<i>Figura 2.4. Impactes ambientais diretos (Energia Primária) dos materiais de isolamento selecionados, assumindo 5% de perda de material (adaptado de Biswas et al., 2016).</i>	11
<i>Figura 2.5. Impactes ambientais diretos (GWP₁₀₀) dos materiais de isolamento selecionados, assumindo 5% de perda de material. Adaptado de Biswas et al. (2016).</i>	12
<i>Figura 2.6. MycoFoam™ Cooler (Ecovative, 2016).</i>	14
<i>Figura 2.7. Mushroom® Insulation and Acoustics (Ecovative, 2016).</i>	14
<i>Figura 3.1. Painel de lã da madeira (Archiproducts, 2016).</i>	18
<i>Figura 3.2. Painel de fibra da madeira (Archiproducts, 2016).</i>	18
<i>Figura 3.3. Representação geral da estrutura de um fungo superior com corpo frutífero (adaptado de Salsa, 2004).</i>	21
<i>Figura 3.4. Representação esquemática que descreve o crescimento apical. R-Ramificação; S-Septo; PS-Poro Septal; V-Vacúolo; N-Núcleo; RE- Reticulo endoplasmático; MC- Membrana Plasmática; P-Parede; AG-Aparelho de Golgi; VC-Vesículas Citoplasmáticas; CA-Crescimento Apical; (adaptado de Nevalainen e Peterson, 2014).</i>	22
<i>Figura 3.5. Representação da inoculação pela parte da hifa a uma partícula nutritiva. A – partícula nutritiva; B – células do micélio; (adaptado de Bayer et al., 2008).</i>	23
<i>Figura 3.6. Corpo frutífero de Pleurotus ostreatus. Foto de Marisa Azul.</i>	25
<i>Figura 4.1. Serradura de madeira de pinho.</i>	28
<i>Figura 4.2. Farelo de trigo.</i>	28
<i>Figura 4.3. Casca de arroz.</i>	28
<i>Figura 4.4. Palha de trigo.</i>	28
<i>Figura 4.5. Pedacos de palha de trigo.</i>	29
<i>Figura 4.6. Spawn de Pleurotus Ostreatus.</i>	29
<i>Figura 4.7. Biomassa A.</i>	29
<i>Figura 4.8. Biomassa B.</i>	29
<i>Figura 4.9. Biomassa C.</i>	29
<i>Figura 4.10. Biomassa D.</i>	29
<i>Figura 4.11. Biomassa E.</i>	30
<i>Figura 4.12. Processo de esterilização utilizando um forno de secagem.</i>	31
<i>Figura 4.13. Caixa de polipropileno.</i>	32

<i>Figura 4.14 Contaminação na amostra.</i>	34
<i>Figura 4.15. Amostra que apresenta problemas de crescimento do micélio e falta de propagação concentrada na zona onde esteve em contacto com fundo da caixa.</i>	34
<i>Figura 4.16. Amostra com um bom desenvolvimento do micélio, mas com falta de propagação concentrada...</i>	34
<i>Figura 4.17. Sumário do procedimento para o desenvolvimento do biomaterial.</i>	39
<i>Figura 5.1. Superfície do recipiente do substrato inoculado (Yang et al., 2011).</i>	41
<i>Figura 5.2. Imagem da superfície do substrato com edição e sem edição.</i>	42
<i>Figura 5.3. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do substrato B para monocromática através do método A.</i>	43
<i>Figura 5.4. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do substrato B para monocromática através do método B.</i>	43
<i>Figura 5.5. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do Substrato B para monocromática através do método C.</i>	43
<i>Figura 5.6. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do Substrato B para monocromática através do método D.</i>	43
<i>Figura 5.7. Sensor Hot Disk Kapton 4922.</i>	45
<i>Figura 5.8. Montagem dos provetes para a medição da condutividade térmica.</i>	46
<i>Figura 6.1. Crescimento de Pleurotus eryngii incubado a diferentes temperaturas (A) e humidade relativa (B) (Yang et al., 2011).</i>	52
<i>Figura 6.2. Amostra H, com 50% de spawn na composição final.</i>	56
<i>Figura A.1. Amostra B.</i>	A-3
<i>Figura A.2. Amostra C.</i>	A-3
<i>Figura A.3. Amostra D</i>	A-3
<i>Figura A.4. Amostra E.</i>	A-3
<i>Figura A.5. Amostra F.</i>	A-3
<i>Figura A.6. Amostra G.</i>	A-3
<i>Figura A.7. Amostra H.</i>	A-4
<i>Figura A.8. Amostra I.</i>	A-4

ÍNDICE DE QUADROS

<i>Quadro 2.1. Ações associadas ao consumo de energia primária e emissões associadas nas diferentes etapas do ciclo de vida (adaptado de Biswas et al., 2016).</i>	11
<i>Quadro 4.1. Quadro resumo da solução de problemas no cultivo de cogumelos (Sánchez, 2009).</i>	35
<i>Quadro 4.2. Substratos utilizados no processo final, em percentagem.</i>	36
<i>Quadro 4.3. Espessuras das amostras finais resultantes da compressão.</i>	38
<i>Quadro 5.1. Percentagem de ocupação do fungo para cada tipo de metodologia.</i>	44
<i>Quadro 5.2. Percentagem de perda de água no biomaterial, após processo de secagem.</i>	48
<i>Quadro 5.3. Densidade das amostras antes e após o processo de secagem.</i>	48
<i>Quadro 5.4. Condutividade térmica axial e radial média para os diferentes tipos de substrato.</i>	49
<i>Quadro 6.1. Percentagem de ocupação do micélio nos diferentes tipos de substrato.</i>	51
<i>Quadro 6.2. Esquematização das variações realizadas nos substratos.</i>	51
<i>Quadro 6.3. Densidade média das amostras pouco secas.</i>	54
<i>Quadro 6.4. Densidade média das amostras secas.</i>	54
<i>Quadro 6.5. Condutividade térmica axial média das amostras pouco secas.</i>	54
<i>Quadro 6.6. Condutividade térmica axial média das amostras secas.</i>	54
<i>Quadro 6.7. Resumo das observações dos resultados para os diferentes tipos de substratos.</i>	57
<i>Quadro 6.8. Condutibilidade térmica de materiais isolantes (Santos e Matias, 2006, Wei et al., 2015, Ecovative, 2016).</i>	59
<i>Quadro A.1. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.</i>	A-1
<i>Quadro A.2. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.</i>	A-2
<i>Quadro A.3. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.</i>	A-2
<i>Quadro A.4 Resultado dos ensaios do Hot Disk para as amostras pouco secas.</i>	A-4
<i>Quadro A.5. Resultado dos ensaios do Hot Disk para as amostras secas.</i>	A-5

ABREVIATURAS

CORDIS	Community Research and Development Information Service
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Placas de Poliestireno Expandido
GWP ₁₀₀	Potencial de aquecimento global
HBCD	Hexabromociclododecano
IEA	International Energy Agency
INE	Instituto Nacional de Estatística
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PIR	Placas de Poli-isocianurato
RSTIB	Rice Straw Thermal Insulation Board
TPS	Transient Plane Source
UE	União Europeia
XPS	Poliestireno extrudido

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

O aumento da população e a procura constante por melhores condições de vida são responsáveis pelo aumento do consumo de energia, mas também pelo aumento da emissão de energia para o espaço. Estes aumentos de consumo e emissão de energia conduzem a uma das principais preocupações e compromissos, as alterações climáticas e o desenvolvimento de tecnologias de mitigação e adaptação para a sustentabilidade do nosso planeta. Fatores de risco como a degradação dos recursos de água e do solo, deterioração da saúde das pessoas e dos ecossistemas e, alteração dos constituintes da atmosfera são preocupações do local ao global, com consequências cada vez mais gravosas e imprevisíveis para o nosso Planeta (Greenspec, 2016).

Um dos setores que contribui para o elevado gasto energético é a construção. O ciclo de vida dos edifícios conduz a um elevado gasto energético desde a extração da matéria-prima até à sua utilização. Para a redução do consumo energético no sector da indústria é importante adotar uma política de engenharia verde. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2016) a engenharia verde representa “ *o design, comercialização e uso de processos e produtos de maneira a reduzir a poluição, promover a sustentabilidade e minimizar os riscos para a saúde humana e do meio ambiente sem sacrificar a viabilidade e eficácia económica*”.

É indispensável a avaliação do ciclo de vida dos materiais, desde a eliminação de compostos tóxicos, à proteção da natureza, da redução do consumo de recursos, à reutilização de recursos, da utilização de recursos sustentáveis à qualidade na engenharia civil.

Neste enquadramento, dispor de uma boa eficiência energética e anular as emissões de gases poluentes, constituem dois objetivos principais a considerar ao longo do ciclo de vida de um edifício. Tal traduz-se atualmente pela diminuição da energia operacional do edifício que consequentemente leva a um aumento da energia incorporada nos materiais.

O desenvolvimento de materiais de isolamento com o aumento na energia incorporada nos materiais representa o cenário do mercado atual. A maioria dos materiais de isolamento apresenta características de condutividade térmica com aptidão de reduzir a utilização de recursos elétricos para a manutenção do ambiente interior através de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado. No entanto, apesar das boas características térmicas de materiais como as Placas de Poli-isocianurato (PIR), as Placas de Poliestireno expandido (EPS), e as Placas de Poliestireno extrudido (XPS), são muitos os impactos negativos para a saúde humana e ambiental. O impacto negativo manifesta-se tanto no seu processo de fabrico como ao longo do ciclo de vida, levantando questões incontornáveis para a economia e a sustentabilidade. É pois urgente e necessário o desenvolvimento de materiais alternativos desde o ponto de vista energético e funcionalidade em termos de recursos disponíveis.

O controlo da produção de resíduos nas diversas áreas, nomeadamente no sector florestal e agrícola, constitui outra preocupação na Europa. Nos últimos anos, assistimos à preocupação crescente para a valorização dos resíduos lenhínicos, através de programas de financiamento específicos pela Comissão Europeia. A valorização destes resíduos passa também pelo objetivo de reduzir a utilização de recursos fósseis em 80-100% e a redução acima dos 30% na emissão de CO₂ e energia. Pretende-se que estes valores sejam alcançados com o desenvolvimento de fluxos de resíduos e a listagem de um número chave de vias de utilização e valorização desses resíduos (CORDIS, 2016). O forte investimento nesta área mostra a importância que têm a *reutilização de resíduos agroflorestais para a sua valorização, redução da utilização de recursos fósseis, energia e emissões de CO₂*. Ou seja, existe cada vez mais uma forte aplicação do conceito de engenharia verde nas várias políticas europeias.

Este trabalho de desenvolvimento de um biomaterial a partir da utilização de resíduos agroflorestais processados e micélio de fungos, pretende aplicar os princípios da engenharia verde. A utilização de resíduos agroflorestais e do micélio do fungo prende-se com o facto de serem materiais renováveis e biodegradáveis. Ao contrário das matérias-primas apresentadas no mercado com soluções mais convencionais, os resíduos agroflorestais que vão ser utilizados não são tóxicos, reduzem a energia incorporada nos materiais e a sua utilização promove a florestação controlada que induz à redução do dióxido de carbono presente na atmosfera.

O desenvolvimento do biomaterial está associado a uma metodologia que aumenta a eficiência do papel do fungo na transformação do substrato modificado, concretamente como componente integrante e de ligação dos constituintes (resíduos agroflorestais). Deste modo, é uma alternativa aos ligantes ou processos químicos já utilizados em produtos de finalidade semelhante, que contribuem negativamente para a sustentabilidade do nosso planeta.

1.2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo final é a transformação, com baixa incorporação energética, dos resíduos agroflorestais num produto com elevado potencial para uso em material de isolamento térmico. Este objetivo será atingido através dos seguintes objetivos parcelares:

- A seleção da espécie de fungo apropriada, através da caracterização e avaliação do comportamento quanto ao substrato.
- Desenvolvimento do biomaterial em laboratório.
- Caracterização do biomaterial: propriedades físicas, térmicas e higroscópicas.

Tendo em conta esta metodologia, a dissertação é estruturada da seguinte forma:

- A **INTRODUÇÃO** apresenta o tema em estudo e a sua relevância.
- O **ESTADO DE ARTE** expõe um enquadramento do estado do conhecimento em termos da energia. É exibida uma análise do gasto energético mundial e a sua relação com o consumo energético habitacional. Descreve-se a análise do ciclo de vida nos materiais de isolamento e a importância que a energia incorporada nos materiais possui para um desenvolvimento sustentável. Em conclusão, são descritos alguns exemplos já desenvolvidos de materiais de isolamento no contexto da política de engenharia verde.
- **BIOMATERIAL** é o capítulo onde são descritos vários conceitos para compreensão do trabalho desenvolvido. São apresentados os seus principais constituintes, e a forma encontrada para acelerar o processo de desenvolvimento do biomaterial. De uma maneira simplificada está descrita a fisiologia dos fungos, focada essencialmente nos fungos multicelulares saprófitos. Os temas abordados são o crescimento, nutrição e metabolismo que são os mais relevantes para o desenvolvimento do produto final. É por fim apresentado o fungo utilizado e as motivações que estiveram na base da sua escolha.
- Na **METODOLOGIA** são apresentados os procedimentos laboratoriais para a obtenção do biomaterial final, onde se inclui a apresentação de todas as composições dos substratos testados.

- Nos **TESTES ANALÍTICOS** é exibida uma metodologia através de análise de imagem para estudar a influência dos diferentes tipos de substrato no crescimento do fungo. É descrito o procedimento para o cálculo das propriedades térmicas dos biomateriais resultantes da otimização do processo de desenvolvimento.
- Na **DISCUSSÃO DOS RESULTADOS** é feita uma validação dos resultados dos testes analíticos realizados. É feita uma análise crítica à qualidade das amostras obtidas, sendo feita uma comparação com produtos já desenvolvidos.
- A **CONCLUSÃO** apresenta um balanço do trabalho realizado, servindo para justificar as temáticas de estudo a realizar no seguimento deste trabalho.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é inicialmente apresentado o enquadramento energético das questões abordadas nesta dissertação. É apresentada uma análise do gasto energético mundial, sua relação com o consumo energético habitacional e as emissões de CO₂. Descreve-se e discute-se a análise do ciclo de vida dos materiais de isolamento e a importância que a energia incorporada nos materiais tem para um desenvolvimento sustentável. São também demonstrados alguns exemplos de materiais já desenvolvidos no âmbito das políticas de engenharia verde.

2.2 ENERGIA

2.2.1 Consumo energético

Nos últimos anos houve um rápido crescimento do uso de energia a nível global. Este crescimento trouxe consigo grandes preocupações em torno das dificuldades de obtenção ou esgotamento dos recursos energéticos. Em consequência resultam grandes impactos ambientais como o desgaste da camada de ozono, o aquecimento global, as mudanças climáticas, etc (Pérez-Lombard et al., 2008).

A Agência Internacional de Energia (IEA-International Energy Agency) apresenta relatórios anuais com estimativas associadas aos recursos energéticos. Nas últimas quatro décadas (1973 a 2013) houve um aumento mundial de 51,8% nas emissões de CO₂ para a atmosfera (Figura 2.1; fonte (IEA, 2015)). A fonte principal das emissões de CO₂ continua a ser a queima de combustíveis utilizados para satisfazer as nossas necessidades energéticas.

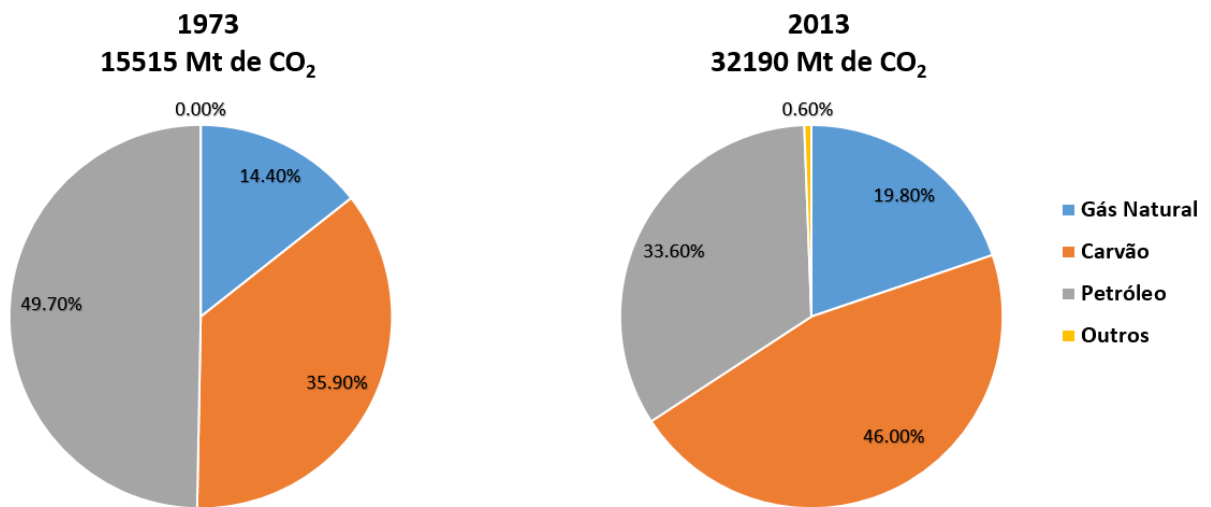


Figura 2.1. Total de emissões de CO₂ nos anos de 1973 e 2013 (adaptado de IEA, 2015).

A Figura 2.2 ilustra que, para o mesmo período de tempo (1973-2013), ocorreu um aumento do consumo de *energia final* de 54.9%. Esta *energia final* corresponde ao somatório dos consumos em múltiplos sectores, apresentados adiante.

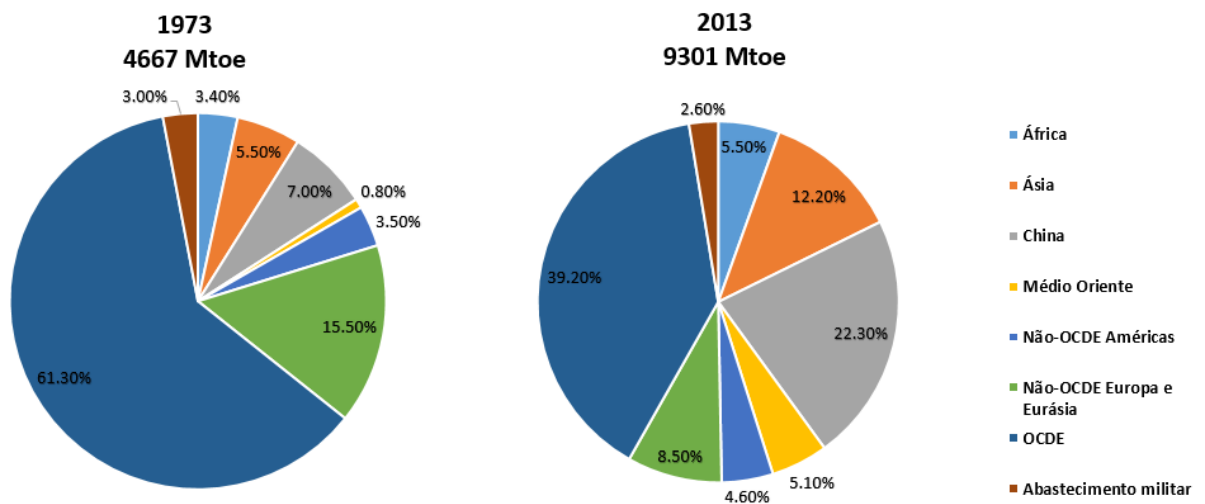


Figura 2.2. Energia final consumida no Mundo nos anos de 1973 e 2013 (adaptado de IEA, 2015).

Das figuras 2.1 e 2.2 podemos fazer a associação entre o aumento das emissões de CO₂ e a energia final consumida, podendo-se concluir que a percentagem do aumento de consumo de energia se aproxima do valor da percentagem do aumento de emissões de CO₂. Ou seja, a forte

necessidade atual do consumo de energia só é garantida com o consumo de recursos não renováveis o que se traduz numa grande emissão de CO₂ para a atmosfera. A China é um exemplo da forte necessidade energética que resulta do elevado crescimento industrial do país, que segundo Torgal e Jalali (2010) coloca em funcionamento uma nova central a carvão a cada duas semanas. Estas centrais representam 80% da produção elétrica na China.

A energia final consumida é usualmente dividida em três setores principais: Indústria, Transporte e “Outros”. A categoria “Outros” abrange os sectores da agricultura e floresta, habitação, serviços públicos e comércio. Assim, o consumo energético dos edifícios está diretamente relacionado com a energia final consumida. Na UE (União Europeia) o setor habitacional tem um grande peso no consumo energético final em relação a grandes sectores como a indústria e transportes. Sendo que em 2013 o consumo no sector da habitação chega a ultrapassar o sector da indústria, como é demonstrado na Figura 2.3.

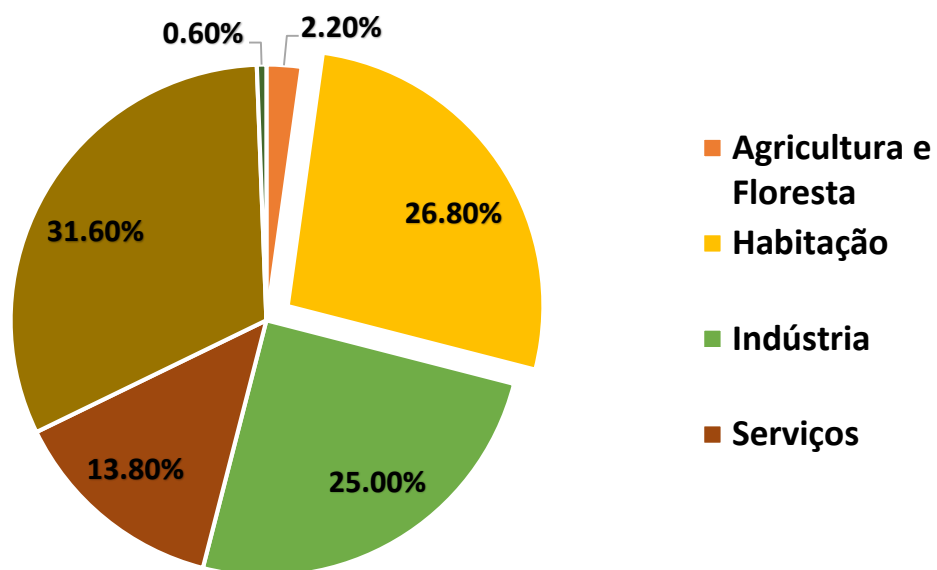


Figura 2.3. Energia consumida final por sector na UE, em 2013 (% de tonelada de petróleo equivalente) (adaptado de Eurostat, 2016).

Como observamos da Figura 2.3 o sector do transporte é o que apresenta o maior consumo de energia final. Segundo a EPA (2016), tal deve-se ao facto de existir um aumento na necessidade de viagem e do número de quilómetros percorridos por veículos ligeiros de passageiros e

veículos comerciais. Este aumento foi afetado pelos crescimentos económico e populacional e pela expansão urbana ocorridos nos últimos anos.

Segundo Pérez-Lombard et al. (2008) fatores como o aumento da população, melhoria dos serviços da construção e aumento do conforto levam a um maior tempo despendido no interior dos edifício, o que provoca um aumento do consumo da energia final para um nível próximo do sector do transporte e ultrapassando o sector da indústria. Assim, este elevado consumo energético, associado com as emissões de CO₂, levou a que a eficiência energética e estratégias de poupança se tornassem uma prioridade nas políticas energéticas de muitos países.

Assim, concluímos que o crescimento global está num nível que não consegue ser acompanhado pelo desenvolvimento tecnológico. Isto é demonstrado pela insustentabilidade provocada no nosso planeta pelos recursos utilizados para fazer face a grande necessidade energética. Assim, torna-se cada vez mais importante procurar solução para contrariar este problema.

2.2.2 Ciclo de vida

Para reduzir os impactes ambientais por parte do sector da construção, para além da eliminação de compostos tóxicos, promoção da reutilização de recurso e utilização de recursos sustentáveis, é fundamental reduzir o consumo energético através da avaliação da energia total do ciclo de vida do edifício, que inclui a energia incorporada nos materiais e de operação:

- **Energia incorporada nos materiais** - compreende a energia consumida durante a extração e processamento de matérias-primas, o transporte, a fabricação dos materiais de construção e componentes e a energia utilizada durante os vários processos de construção e demolição do edifício (Ding, 2004).
- **Energia de operação** - a energia despendida na manutenção do ambiente interior através de processos como o aquecimento ou arrefecimento, iluminação e aparelhos (Cabeza et al., 2013).

2.2.3 Energia incorporada nos materiais e energia operacional

Nas últimas décadas tem-se verificado que uma grande parte do consumo energético de um edifício se deve à sua parcela da energia operacional. Este fato resulta de edifícios pouco eficientes do ponto de vista energético e com elevados consumos, e nos quais a energia dos materiais totaliza uma parcela de 10 a 15 % da energia operacional.

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética dos edifícios, reduzindo a energia operacional, aumentou-se a parcela referente a energia incorporada nos materiais (Torgal e Jalali, 2010). Thormark (2002) num estudo realizado em apartamentos localizados na Suécia, refere que a energia incorporada nos materiais para uma vida útil de 50 anos pode representar 45% da energia total. Torgal e Jalali (2010) defendem que a médio ou a curto prazo pode admitir-se que a parcela da energia incorporada nos materiais de construção possa vir a exceder a parcela da energia operacional. É pois essencial reduzir a energia incorporada nos materiais numa análise do ciclo de vida de um edifício. Neste âmbito um dos aspetos centrais são os isolamentos térmicos.

2.2.4 Isolamento térmico

A aplicação de um isolamento eficaz contribui significativamente para a redução da energia operacional. Costa (1974) refere que um bom isolamento térmico deve apresentar as seguintes qualidades:

- Baixa condutibilidade térmica;
- Resistência a temperatura aplicada;
- Boa resistência mecânica;
- Ser imputrescível e inatacável por pragas;
- Ser incombustível;
- Não ser higroscópico e apresentar, se possível, baixa porosidade à penetração do vapor de água.

Apesar disso é importante avaliar os problemas resultantes para a sustentabilidade do nosso planeta. Os impactos ambientais de um material de isolamento ao longo do seu tempo de vida pode ser dividido em duas categorias:

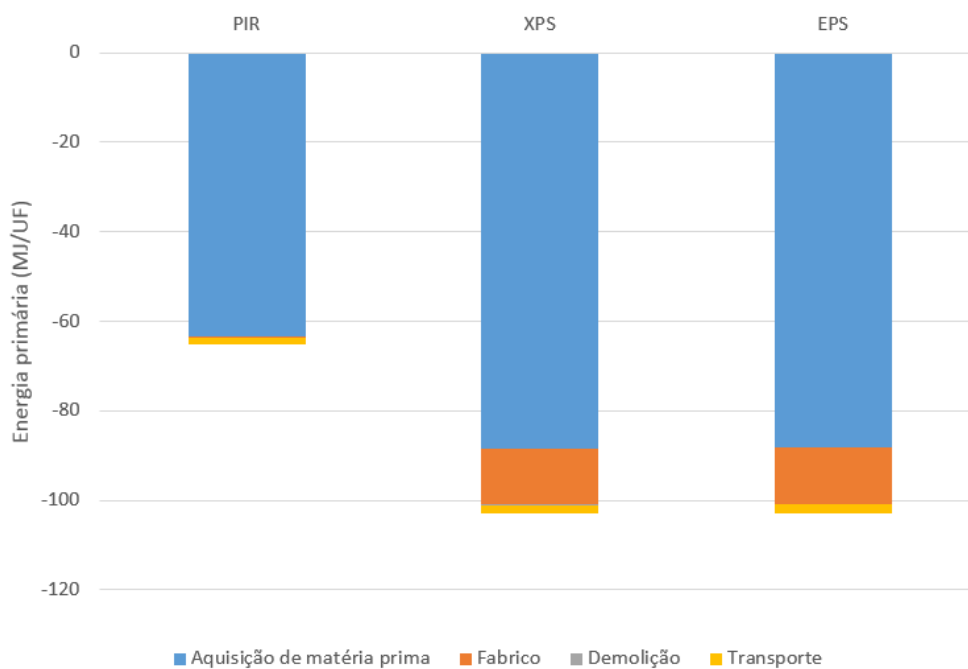
- **Impactes diretos:** resultantes da energia retida nos materiais de isolamento;
- **Impactes indiretos:** como resultado da redução do consumo de energia operacional dos edifícios devido à adição de isolamento (Biswas et al., 2016).

Biswas et al. (2016) realizou estudos que incidiram sobre a avaliação dos impactos ambientais e energéticos ao longo da vida em materiais de isolamento para edifícios comerciais, a saber: Placas de Poli-isocianurato (PIR), Placas de Poliestireno expandido (EPS) e Placas de Poliestireno extrudido (XPS). Estes materiais para além das boas características de condutividade térmica apresentam vantagens adicionais importantes, como a possibilidade de reciclagem, ou reutilização em condições adequadas, a elevada resistência à compressão e impermeabilidade (exceto o EPS) (Greenspec, 2016). Os cálculos realizados por Biswas et al. (2016) incidem sobre os impactos diretos descritos em dois tipos de categorias:

- **Energia primária consumida e as suas emissões associadas** estão presentes nas várias etapas do ciclo de vida dos materiais de isolamento e são descritas no Quadro 2.1. O valor é em MJ por unidade funcional. Para os materiais de isolamento já descritos apresentam os valores indicados na Figura 2.4, admitindo 5% de perda de material durante o ciclo de vida.
- **GWP₁₀₀ (Potencial de aquecimento global):** em kg de CO₂ equivalente por unidade funcional. É a razão entre a quantidade de calor retido devido a uma certa massa de gás emitida para a atmosfera com a quantidade de calor retido pela mesma massa de CO₂ em 100 anos. Com as mesmas condições que a categoria anterior os valores de GWP₁₀₀ estão indicados na Figura 2.5.

Quadro 2.1. Ações associadas ao consumo de energia primária e emissões associadas nas diferentes etapas do ciclo de vida (adaptado de Biswas et al., 2016).

Etapas do ciclo de vida	Ações
Aquisição de matéria-prima ou secundária (inclui os produtos virgens e reciclados)	Obtenção da matéria-prima ou secundária; Processamento da matéria-prima ou secundária.
Fabrico	Produção do material final utilizando a matéria-prima ou secundária; Produção de resíduos; Embalamento do produto final.
Instalação e uso	Instalação do produto que inclui os resíduos criados neste processo; Emissões que ocorrem durante o tempo de vida do produto e durante a manutenção em condições normais.
Demolição	Desmantelamento e demolição do produto;
Transporte	Transporte das matérias-primas para a fábrica; Transporte do produto final até ao local de construção; Transporte dos resíduos provenientes da demolição até ao aterro; Transporte dos resíduos até ao local da segunda construção quando o produto é reciclado.

**Figura 2.4.** Impactes ambientais diretos (Energia Primária) dos materiais de isolamento selecionados, assumindo 5% de perda de material (adaptado de Biswas et al., 2016).

Conclui-se destes resultados aquilo que foi referido no subcapítulo do ciclo de vida, que a energia incorporada no material é um fator muito importante na sua análise. Segundo a Figura 2.4 podemos concluir que o XPS e o EPS são os que contêm o maior gasto de energia primária ficando o PIR atrás destes dois materiais. É importante salientar que estes materiais possuem uma grande utilização comercial e que é importante contrariar a sua utilização para benefício do ciclo de vida de uma construção.

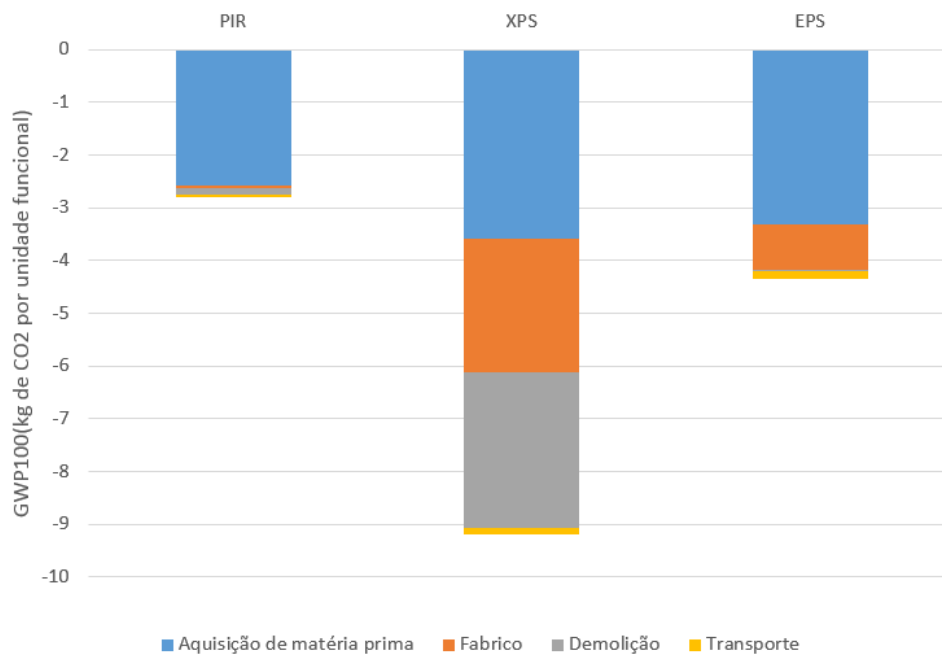


Figura 2.5. Impactes ambientais diretos (GWP_{100}) dos materiais de isolamento seleccionados, assumindo 5% de perda de material. Adaptado de Biswas et al. (2016).

Para além de contribuírem negativamente para o ciclo de vida, por consumirem elevada energia primária em vários processos do seu ciclo de vida, também contribuem negativamente em termos de impactes ambientais. Como podemos concluir da Figura 2.5 o XPS é dos que mais contribui com a libertação de CO_2 para a atmosfera ao longo do seu ciclo de vida, mas todos eles contribuem negativamente e de maneira significativa.

É necessário também fazer uma avaliação dos impactes que um produto químico pode provocar na saúde humana. Estes materiais para além de afetarem a sustentabilidade do planeta na medida descrita anteriormente também apresentam toxicidade nas mais diversas formas, quer

seja por libertação de gases, ou pela contaminação da água e exposição direta e diária. Sendo que estes materiais apresentam os seguintes tipos de toxicidade:

- No processo de produção do XPS e EPS são emitidos para a atmosfera compostos como o estireno e outros hidrocarbonetos que são prejudiciais para a saúde ambiental e humana. No produto final podem ainda existir resíduos instáveis de monómeros de estireno que podem gasificar.
- O HBCD (hexabromociclododecano), composto utilizado como retardador do fogo no XPS e EPS, é considerado perigoso para a saúde humana.
- No processo de fabrico do PIR são produzidos uma série de resíduos perigosos indicados na diretiva EU 91/689/CEE. Estes resíduos tanto contaminam a água como a atmosfera (Greenspec, 2016).

2.2.5 Isolamentos térmicos à base de materiais naturais e de resíduos

Entre os exemplos de isolamentos térmicos à base de materiais e de resíduos, destacam-se os compósitos de cortiça, desperdícios de papel e fibras de cânhamo (Eires et al., 2010).

Recentemente surgiu no mercado a empresa Ecovative (2016), que aposta nos fungos para o fabrico de materiais para moldes de empacotamento; o fungo assume a função de agregador de resíduos agrícolas, como ilustra a Figura 2.6. O desenvolvimento de materiais à base de micélio foi estudado por Holt et al. (2012) que utilizaram o fungo *Ganoderma* sp. e resíduos da planta de algodão para desenvolverem estruturas de empacotamento e avaliação das suas propriedades térmicas com o objetivo de dissipação térmica. Também Travaglini et al. (2013) desenvolveram um biomaterial a partir do fungo medicinal *Ganoderma lucidum* e resíduos de madeira do carvalho, *Quercus kelloggii*, com avaliação das suas propriedades mecânicas.

A utilização de resíduos agroflorestais e micélio de fungo para o desenvolvimento de materiais de isolamento está ainda pouco desenvolvida. Apenas a empresa Ecovative (2016) caracterizou as propriedades térmicas de um biomaterial desenvolvido a partir de micélio, inserido em paredes pré-fabricadas de madeira (Figura 2.7). O material apresenta uma densidade de 122 kg/m³, associado a uma condutividade térmica de 0.039 W/mK; está em processo de desenvolvimento para ser inserido no mercado da construção (Ecovative, 2016).



Figura 2.6. MycoFoam™ Cooler (Ecovative, 2016).



Figura 2.7. Mushroom® Insulation and Acoustics (Ecovative, 2016).

Os produtos desenvolvidos pela empresa Ecovative (2016) apresentam aplicações de enorme interesse para a economia e sustentabilidade, uma vez que são uma alternativa aos materiais químicos, mas com características funcionais semelhantes. O futuro dos materiais passa pela elevada *performance*, segurança, saúde, elevada qualidade e fabrico sustentável (Ecovative, 2016).

3 BIOMATERIAL

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os constituintes do biomaterial em estudo, que inclui a caracterização do substrato modificado associado à utilização de resíduos agroflorestais e do micélio do fungo: *Pleurotus ostreatus*. São igualmente apresentados conceitos essenciais à compreensão do trabalho, em particular relacionados com a biologia dos fungos.

3.2 SUBSTRATO MODIFICADO

O **substrato modificado** representa uma mistura de vários constituintes orgânicos ou inorgânicos, de carácter nutricional ou não-nutricional, que permitem o desenvolvimento de um biomaterial com características específicas, como: 1) isolamento acústico, 2) isolamento térmico, 3) absorção ao choque, 4) proteção ao fogo, 5) biodegradabilidade, 6) flexibilidade, 7) rigidez e 8) (im)permeabilidade. Estas características conferem propriedades que variam em função da escolha dos constituintes e condições de inoculação (Bayer et al., 2008).

O desenvolvimento de um biomaterial requer a seleção criteriosa dos constituintes do substrato, neste caso com propriedades que possam conferir um bom isolamento térmico, mas também compatibilidade com o componente que irá promover a função de matriz, aqui o micélio de fungo. Das figuras Figura 2.4 e Figura 2.5 é visível que a fase mais negativa do ciclo de vida dos materiais PIR, XPS e EPS é a aquisição de matéria prima. Este trabalho procura contrariar o atual ciclo de vida dos materiais correntes através da utilização de resíduos agroflorestais e micélio de fungos, com soluções com impactes ambientais positivos diretos, e alternativas no mercado resilientes e sustentáveis.

Neste trabalho, o substrato modificado contém como componentes básicos os resíduos agroflorestais e micélio de fungo, e **aditivos**, que são componentes que vão aumentar a eficácia do substrato, sendo materiais que contribuem para o crescimento do fungo e o desenvolvimento de uma matriz entre os diferentes materiais que irá reforçar as características pretendidas do material.

Como constituintes principais foram escolhidos a casca de arroz e a serradura, e como aditivos optou-se pela utilização de derivados do trigo. O micélio como vimos vai ser o ligante de todos estes componentes. Os vários fatores que contribuíram para a escolha dos materiais do substrato modificado são:

- **Materiais “Amigos do ambiente”** – a madeira, a casca de arroz, os derivados do trigo e o micélio são produtos que provêm da natureza, são materiais renováveis, portanto promotores de economias de valor acrescentado, seja pela reutilização de resíduos, seja pelo processo de sustentabilidade associado, portanto num alinhamento notável como políticas florestais promotoras de bioeconomia, resiliência, saúde e sustentabilidade. Por outro lado, os produtos da floresta, agricultura e fungos apresentam valores energéticos de produção baixos, conciliadores de métodos de produção mais eficientes (Cachim, 2007).
- **Recursos predominantes em Portugal** – a floresta apresenta uma taxa de ocupação do solo de 38%, o que permite um crescimento no consumo dos diversos produtos florestais (Cachim, 2007). Segundo o INE (2016) o arroz e o trigo são dos principais produtos agrícolas produzidos em Portugal, sendo respetivamente produzidos 185 mil toneladas e 80 mil toneladas, proporcionando assim facilidade na sua obtenção.
- **Utilização emergente de fungos** – o micélio de fungos representam um recurso emergente no desenvolvimento de materiais de construção, de embalagem e de design (Bayer et al., 2008, Travaglini et al., 2013). Os fungos contribuem na decomposição dos elementos do substrato e na criação de uma matriz de ligação entre as fibras da madeira e casca de arroz, podendo também proporcionar propriedades térmicas ao material

3.3 SUBSTRATO MODIFICADO: MADEIRA & DERIVADOS

3.3.1 Resíduos da madeira

A madeira representa um dos materiais mais utilizados pelo Homem. A inovação em tecnologia tem contribuído para o desenvolvimento do aproveitamento de resíduos do processo de transformação da madeira bem como de elementos derivados a partir da recuperação de resíduos transformados. Existem vários exemplos de produtos que aproveitam os resíduos de indústria da madeira para os transformar em produtos de isolamento térmico. Dois desses exemplos são a lã da madeira e a fibra da madeira:

- **Lã da madeira** – este material de isolamento, Figura 3.1, é obtido da compressão de resíduos provenientes de serrações de madeira, sem qualquer necessidade de adição de aglutinante por conter o seu próprio (lenhina). É um material que apresenta uma condutibilidade térmica de $0,039 \text{ W/(mK)}$ e que pode ser utilizado nas habitações em pavimento, parede, tetos e coberturas. Este isolamento tem como vantagens consumir pouca energia no seu processo de fabricação, emissões de CO_2 relativamente baixas e baixo custo de manufatura. Os únicos inconvenientes são apresentar compactação vertical e serem um melhor isolamento contra o frio no inverno do que contra o calor no verão (Silva, 2013).
- **Fibra de madeira** – este material (Figura 3.2) também resulta da compressão de resíduos de madeira, tendo as mesmas aplicações na habitação. Este material apresenta as mesmas vantagens que a lã de madeira, com uma condutibilidade térmica de $0,05 \text{ W/(mK)}$. Em termos de inconvenientes apresenta em comparação com a lã da madeira uma elevada energia incorporada no material (Silva, 2013).

Os resíduos da madeira são um componente importante do biomaterial em estudo, determinante para as características de isolamento térmico, como nos materiais exemplificados anteriormente.



Figura 3.1. Pannel de lã da madeira (Archiproducts, 2016).



Figura 3.2. Pannel de fibra da madeira (Archiproducts, 2016).

3.3.2 Casca de arroz

O aproveitamento de resíduos agrícolas para o fabrico de materiais de construção representa uma estratégia crescente. Os resíduos provenientes da colheita e pós-colheita são normalmente queimados ou despejados nos terrenos agrícolas e constituem um problema para o sector. Por outro lado, estes resíduos podem causar impactes ambientais graves, nomeadamente na acidificação dos solos e emissão de gases de efeito de estufa, associados à libertação de metano e amoníaco (Panyakaew e Fotios, 2008).

A casca de arroz provém de uma produção aproximada de 100 milhões de toneladas de arroz por ano (Panyakaew e Fotios, 2008). Wei et al. (2015) desenvolveu um isolamento térmico (Rice Straw Thermal Insulation Board, RSTIB, Placa de isolamento térmico de casca de arroz) a partir da casca de arroz, através de prensagem a quente de alta frequência, obtendo placas de densidade de 250 Kg/m³ com condutividade térmica que varia de 0,051 a 0,053 W/(mK).

A casca de arroz foi selecionada para o substrato modificado pelas suas características enquanto isolamento térmico e capacidade nutricional para o fungo (Bayer et al., 2008). Simultaneamente, a sua utilização poderá ter contributo ambiental importante no aproveitamento de resíduos da indústria de arroz.

3.3.3 Aditivos

Neste trabalho foram selecionados como aditivos ao substrato modificado: 1) palha e farelo de trigo (subproduto do processo de confeção da farinha) para aumentar o valor nutritivo do substrato e facilitar o crescimento do micélio do fungo selecionado (Scrase, 1996, Bayer et al., 2008, Erkel, 2009); 2) vários tipos de biomassa provenientes da exploração da indústria da madeira, com o intuito de avaliar a sua capacidade como aditivo.

3.4 SUBSTRATO MODIFICADO: MICÉLIO DE FUNGOS

Os fungos são seres vivos eucariontes¹ heterotróficos, que se alimentam por absorção. Não tendo capacidade para produzirem o seu próprio alimento, como as plantas, desenvolveram a capacidade de produzirem metabolitos com capacidade para degradar polímeros complexos em matéria mais simples, capazes de serem absorvidos (Kavanagh, 2011). Os fungos na natureza apresentam essencialmente três comportamentos: saprófitos², simbiótico e parasita.

Os fungos são reconhecidos como essenciais para a reciclagem da matéria orgânica morta, e.g., matéria vegetal, madeira e seus derivados, embora também possam degradar materiais manufaturados, tais como, tecidos, cabedais e metais (Kavanagh, 2011).

A investigação na biologia dos fungos tem contribuído para identificar metabolitos e caracterizar mecanismos e processos associados à alimentação dos fungos e a sua capacidade de degradação. Os fungos emergem em múltiplos campos da biotecnologia, como a produção alimentar, farmacêutica, biodiesel, etc (Ferreira e Sousa, 2000).

Os fungos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento do biomaterial em estudo, concretamente na agregação de todos os componentes do substrato modificado.

De seguida são apresentadas de forma resumida algumas características dos fungos, associadas à sua estrutura, crescimento, nutrição, princípios que servem de base ao desenvolvimento deste trabalho.

3.4.1 Estrutura dos fungos

Os fungos são na sua maioria multicelulares e filamentosos (Deacon, 1997). A unidade estrutural dos fungos é a hifa que cresce e dá origem ao micélio (Figura 3.3). As hifas estão separadas entre si por paredes internas denominadas septos e são revestidas por uma parede celular com função estrutural e fisiológica. A parede celular é constituída por vários polímeros,

¹ Células com núcleo individualizado e sistema de organelos com funções específicas

² Organismo que se alimenta por absorção de matéria orgânica morta.

entre eles a quitina (Ferreira e Sousa, 2000). O micélio do fungo tem várias funções, nomeadamente a absorção e nutrição.

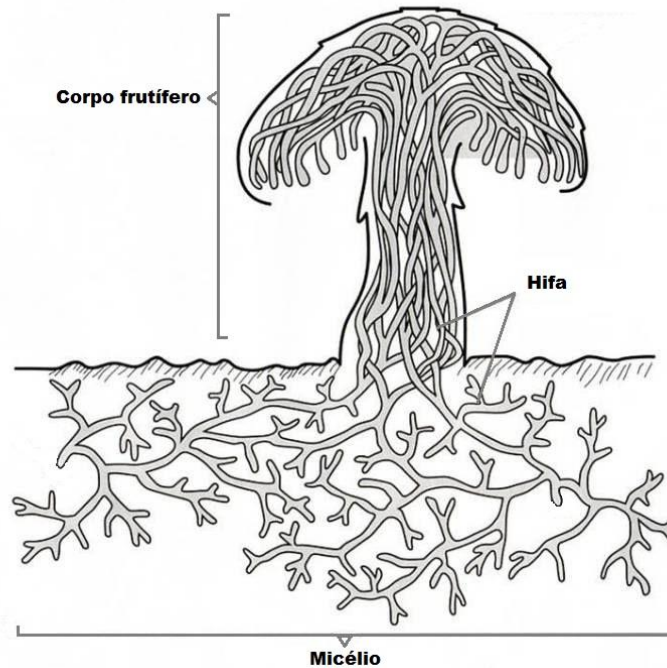


Figura 3.3. Representação geral da estrutura de um fungo superior com corpo frutífero (adaptado de Salsa, 2004).

3.4.2 Crescimento dos fungos

Os fungos têm crescimento essencialmente apical e centrífugo, com a extensão das extremidades das hifas (Figura 3.4). Os constituintes estruturais principais das hifas são a quitina, celulose, proteínas; o micélio tem uma consistência fundamentalmente fibrosa. O crescimento e a estrutura do micélio podem ser muito característicos de determinadas espécies de fungos (Carlile et al., 2004, Deacon, 2005, Haneef et al., 2017).

Os fungos podem ter taxas de crescimento elevadas e apresentarem grande capacidade de adaptação ao meio em que se desenvolvem. Algumas espécies evidenciam taxas de crescimento

idênticas, seja em meio líquido ou em sólido, outras são mais sensíveis à constituição do substrato e requerem condições específicas (Deacon, 2005).

O crescimento do micélio do fungo associado ao substrato é importante para compreender a sua eficácia enquanto componente integrante do biomaterial.

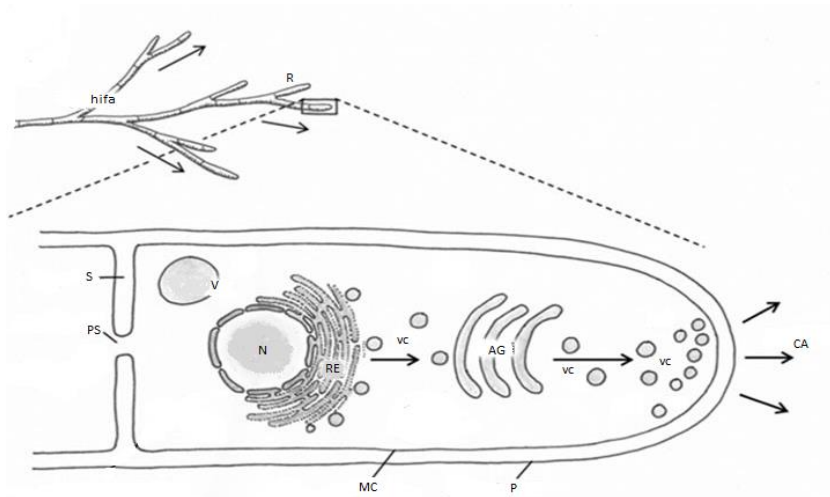


Figura 3.4. Representação esquemática que descreve o crescimento apical. R-Ramificação; S-Septo; PS-Poro Septal; V-Vacúolo; N-Núcleo; RE- Retículo endoplasmático; MC- Membrana Plasmática; P-Parede; AG- Aparelho de Golgi; VC-Vesículas Citoplasmáticas; CA-Crescimento Apical; (adaptado de Nevalainen e Peterson, 2014).

3.4.3 Nutrição

Os fungos alimentam-se por absorção, a partir de moléculas relativamente simples, ou libertam no meio envolvente enzimas que ajudam a degradar a matéria de modo a facilitar o processo e absorção (Kavanagh, 2011), através de um gradiente de difusão ou outros mecanismos de transporte (Travaglini et al., 2013). Os fungos apresentam necessidades nutricionais bastante simples, podendo existir em alguns casos a necessidade de nutrientes específicos para permitir o seu crescimento. O fornecimento de energia é feito através de fontes orgânicas, existindo uma grande vaga de compostos orgânicos que podem ser utilizados pelos fungos (Deacon, 2005).

A utilização de resíduos agroflorestais neste trabalho é justificada por serem uma fonte de celulose. A celulose é o composto orgânico mais abundante da Terra, que representa cerca de 40% de toda a biomassa das plantas que é produzida ou reciclada. Os fungos degradam a

celulose utilizando para o seu desenvolvimento os produtos resultantes como a glicose, monossacáridos ou dissacáridos dependendo da sua necessidade nutricional (Deacon, 1997, Deacon, 2005, Carvalho et al., 2009).

Os fungos superiores saprófitas estão na base do desenvolvimento do biomaterial, devido à sua capacidade de se alimentarem de matéria orgânica morta. Estes fungos vão-se desenvolver no substrato modificado escolhido fazendo a degradação da celulose e de outros nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. Neste seguimento é importante perceber a interação destes fungos com o substrato modificado e a sua relação com a madeira.

3.4.4 Fungo como elemento de ligação do substrato modificado

Como foi descrito o crescimento dos fungos é feito por um processo de ramificação, em que a hifa procura digerir os nutrientes. Assim, estando no substrato modificado nutrientes que permitam o crescimento da hifa, esta vai formar uma rede de células do micélio interconectadas como se observa na Figura 3.5. Esta rede vai envolver os nutrientes e as partículas não-nutritivas podendo por vezes atravessa-las (Bayer et al., 2008).

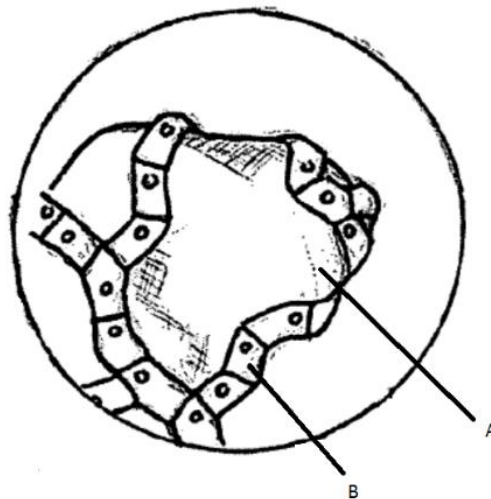


Figura 3.5. Representação da inoculação pela parte da hifa a uma partícula nutritiva. A – partícula nutritiva; B – células do micélio; (adaptado de Bayer et al., 2008).

A rede de micélio ocupa os espaços vazios do substrato e pode interferir nas propriedades mecânicas e físicas do biomaterial. Haneef et al. (2017) demonstram que a variação dos nutrientes constituintes do substrato proporcionam diferenças nas propriedades estruturais do micélio de *G.lucidum* e *Pleurotus ostreatus* no final do seu desenvolvimento.

3.4.5 Fungos que decompõem a madeira

Os fungos que decompõem a madeira podem ser classificados em três grupos: fungos de decomposição branca, fungos de decomposição castanha e fungos de decomposição suave. Dos três grupos, os fungos de decomposição branca evidenciam maior (Carvalho et al., 2009, Hatakka e Hammel, 2011), com capacidade para degradar celulose, hemicelulose e lenhina (polímero com composição química complexa), nomeadamente a partir das enzimas peroxidases e lacases.

Os fungos de podridão branca promovem dois tipos de decomposição na madeira:

- **Podridão não seletiva ou simultânea:** estes fungos colonizam o interior das células da madeira e causam erosão das paredes celulares. Onde são criados vazios que permitem o crescimento do micélio;
- **Podridão seletiva:** estes degradam a lenhina na parede celular com um grau mais elevado que a celulose (Hatakka e Hammel, 2011);

3.4.6 Espécie selecionada: *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm.

Pleurotus ostreatus (Figura 3.6), conhecido pela sua forma de ostra, é a espécie de fungo de podridão branca selecionada para o desenvolvimento do biomaterial em estudo. Esta espécie tem uma distribuição cosmopolita e representa o segundo cogumelo mais cultivado do mundo. *Pleurotus ostreatus* constitui uma espécie com valor ecológico, económico, nutricional e medicinal, pela sua capacidade para degradar uma grande variedade de substratos lenhinocelulósicos que provêm dos sectores agroflorestal e alimentar. As vantagens no seu cultivo incluem a elevada capacidade de decomposição do substrato aliada à pouca necessidade de controlo do ambiente de crescimento (Bonatti et al., 2004, Sánchez, 2009).



Figura 3.6. Corpo frutífero de *Pleurotus ostreatus*. Foto de Marisa Azul.

Um dos critérios para a seleção de *Pleurotus ostreatus* foi o desenvolvimento de um biomaterial associado a um processo de produção mais económico e com menor probabilidade de contaminação.

O substrato modificado foi inoculado com spawn³ de *Pleurotus ostreatus* comercial.

³ O *spawn* é o substrato no qual o micélio do cogumelo se propaga e desenvolve, e o qual é usado como semente na propagação do cogumelo; pode ser em grão, serradura, cavilhas e água (Miles e Chang, 2004). O spawn permite que o fungo seja uma fonte “inesgotável” uma vez que a sua replicação é facilmente feita a nível industrial.

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

A metodologia deste trabalho envolve a caracterização dos materiais utilizados e a explicação dos métodos analíticos para o desenvolvimento do biomaterial.

O método analítico final para o desenvolvimento do biomaterial, surge de vários problemas encontrados na fase inicial de desenvolvimento deste trabalho. Estes problemas estão expostos neste capítulo, bem como as soluções encontradas para a sua resolução.

4.2 PROCEDIMENTO DE DESENVOLVIMENTO DO BIOMATERIAL

4.2.1 Composição do substrato modificado

O substrato modificado representa uma mistura de vários constituintes orgânicos, sendo na sua maioria resíduos agroflorestais. Os resíduos agroflorestais foram adquiridos na indústria de origem. Os aditivos farelo e palha de trigo foram adquiridos no mercado de retalho. É importante ter em atenção o tamanho das partículas nesta fase do processo, pois granulometrias muito finas impedem a circulação do fluxo de ar o que restringe o crescimento do fungo (Scrase, 1996). Segundo Scrase (1996) e Piškur et al. (2011) o valor recomendado é entre 5-15 mm.

Assim os componentes que vão ser utilizados neste trabalho são:

- **Serradura** - foi obtida no SerQ (Centro de inovação e competências da floresta), resultante dos resíduos deixados pelo corte de madeira. A serradura provém de madeira de pinho da espécie *Pinus pinaster*, sendo esta madeira não tratada. A dimensão das partículas varia em média de 1 a 1,5 cm como é demonstrado na Figura 4.1. Devido a sua importância na constituição do biomaterial, são utilizadas grandes quantidades na composição do substrato modificado.

- **Farelo de trigo** - foi obtido da empresa Miranda & Miranda, Lda. apresentando uma granulometria muito fina como se pode observar na Figura 4.2. Devido ao tamanho das partículas ser reduzido, associado ao corte do fluxo de ar, houve uma utilização reduzida deste componente.
- **Casca de arroz** - é um resíduo proveniente do descasque de arroz da cooperativa agrícola de Montemor-o-Velho, CRL. A dimensão das partículas varia é em média de 2 a 3 mm como demonstrado na Figura 4.3. Apesar disto, sendo um componente que é essencial para proporcionar características térmicas ao biomaterial, foram testadas grandes quantidades na composição do substrato.
- **Palha de trigo** – foi obtido da empresa Miranda & Miranda, Lda. tendo a composição que se apresenta na Figura 4.4. É depois utilizada em pedaços com tamanho de 1,5-2,5 cm como se observa na Figura 4.5. A redução do tamanho do componente serve para aumentar a eficiência da sua decomposição por parte micélio. Este tamanho permite também que exista uma distribuição mais uniforme do componente no substrato.
- **Spawn de *Pleurotus ostreatus*** – foi obtido da empresa Quadrante Natural Micologia e Ambiente, Lda., é uma estripe silvestre (Figura 4.6) de Portugal Continental isolado em 2008. Esta estripe é de rápida colonização do substrato, tendo um tempo de incubação de 12 a 20 dias (QuadranteNatural, 2016). A quantidade de spawn recomendada por Bayer et al. (2008) e QuadranteNatural (2016) para a inoculação de um substrato é 5 a 10% do volume total seco do substrato.
- **Biomassa** – foram testados diferentes tipos de biomassas obtidas da empresa de processamento de madeira Pedrosa e Irmãos: **biomassa A** – pinho (Figura 4.7), com dimensões que vão desde partículas de tamanho reduzido a 7 cm; **biomassa B** – casca de eucalipto (Figura 4.8), com dimensões que vão desde partículas de tamanho reduzido a 7 cm; **biomassa C** – pinho + pinho velho (Figura 4.9), com dimensões que vão desde tamanho reduzido a 9 cm; **biomassa D** – fitas de pinho cortadas nas direções das fibras (Figura 4.10), com dimensão média de 5 cm; **biomassa E** – casca de pinho com algumas fitas (Figura 4.11), com dimensões que vão desde partículas de dimensão reduzida a 7 cm. As biomassas foram testadas sem que existisse qualquer processamento da sua constituição ou dimensão.

Quanto à quantidade de água que se deve inserir na mistura, Bayer et al. (2008) recomenda a adição de 30% do volume total do substrato seco. Este foi o valor de referência utilizado, mas quando os componentes do substrato não estão totalmente hidratados foi adicionada mais água.

A água utilizada é da torneira, do SerQ localizado no Município da Sertã. Também foi testado a adição de água misturada com farinha de trigo com uma concentração de 0,10 g/L.

As composições inicialmente testadas para o substrato modificado estão apresentadas no Anexo A, nos quadros A.1, A.2 e A.3 . O aspeto dos componentes que são utilizados nas composições anteriores estão expostas nas figuras de 4.1 a 4.11.



Figura 4.1. Serradura de madeira de pinho.



Figura 4.2. Farelo de trigo.



Figura 4.3. Casca de arroz.



Figura 4.4. Palha de trigo.



Figura 4.5. Pedacos de palha de trigo.



Figura 4.6. Spawn de *Pleurotus Ostreatus*.



Figura 4.7. Biomassa A.



Figura 4.8. Biomassa B.



Figura 4.9. Biomassa C.



Figura 4.10. Biomassa D.



Figura 4.11. Biomassa E.

4.2.2 Esterilização do substrato

Os componentes dos substratos ao serem, na maior parte dos casos, uma fonte rápida de alimento para os fungos, também o são para outros microrganismos. Assim a possibilidade de estes componentes estarem contaminados, afetando o crescimento do fungo, é elevado. É então de grande importância proceder a descontaminação dos componentes antes de serem inoculados com o fungo.

A descontaminação pode ser realizada através de vários processos como a pasteurização, esterilização ou a autoclave. Devido a diversos fatores como a facilidade de execução, economia no processo e por ser um método já utilizado na indústria na madeira optou-se por utilizar o processo de esterilização.

A temperatura e tempo de exposição recomendado pelo fornecedor de fungos é de 60°C pelo menos durante 4 horas (QuadranteNatural, 2016). Adotando as recomendações do fornecedor, utilizando um forno de secagem da marca *MATEST* e colocando os componentes em tabuleiros metálicos ou nas caixas de polipropileno, como demonstrado na Figura 4.12, fez-se a esterilização dos componentes antes de se proceder à preparação do substrato.



Figura 4.12. Processo de esterilização utilizando um forno de secagem.

É importante salientar que para além da esterilização do substrato é feito uma esterilização de todos os materiais utilizados nos próximos passos do processo como também da bancada de trabalho utilizando um borrifador contendo álcool etílico. É também necessário a utilização de luvas em todas as fases do processo.

4.2.3 Preparação do substrato

Após a esterilização de todos os componentes deixaram-se arrefecer os mesmos procedendo-se de seguida à preparação das misturas finais.

Nesta fase, antes de se iniciar o processo de mistura e sempre que se esterilizou novo material foi feito o cálculo das densidades (g/dm^3) dos diferentes componentes. Este cálculo foi realizado com recurso a um recipiente de volume de 1 dm^3 e a uma balança com precisão de $0,1 \text{ g}$.

O processo de medição da densidade de um material passou por encher o recipiente de 1 dm^3 de material e registar a massa, obtendo diretamente a densidade desse material em g/dm^3 .

No fim da medição das densidades, convertemos as percentagens dos quadros no Anexo A para massas que cada componente vai apresentar na mistura final. O processo de cálculo passou por arbitrar um volume total próximo do volume do recipiente onde vai ser inserido o substrato e em seguida calcula-se o volume parcial de cada componente. Tendo o volume parcial de todos

os componentes é só multiplicar a esses valores as densidades correspondentes, resultando assim nas massas que necessitamos de cada componente para a mistura final.

A preparação final do substrato iniciou-se com a adição num recipiente dos componentes sólidos, com exceção do spawn, e manualmente misturou-se até se obter um substrato homogêneo. De seguida adicionou-se o spawn e a água, misturou-se novamente a preparação até todos os componentes estarem hidratados. Tendo o substrato preparado é então inserido nas caixas de polipropileno previamente perfuradas. A perfuração das caixas foi realizada com um objeto de corte sendo feitos vários golpes na superfície da caixa. A perfuração nas caixas permite que exista uma troca gasosa controlada entre o substrato e a atmosfera onde estão inseridas.

4.2.4 Inoculação do fungo

Para inoculação do fungo foi inicialmente depositado o substrato em caixas de polipropileno. A escolha deste tipo de embalagens, demonstrada na Figura 4.13, teve por base os seguintes fatores: são reutilizáveis; podem ser fechadas proporcionando o controlo do fluxo gasoso (como referido anteriormente); não serem degradadas pelo fungo; capacidade de acompanhar o processo de degradação (transparência); aguentarem temperaturas até 120 °C.



Figura 4.13. Caixa de polipropileno.

Assim no final do processo de preparação do substrato encheram-se as caixas de polipropileno com o substrato modificado e fecham-se as caixas sendo armazenadas numa sala condicionada em condições de $T=23^{\circ}\text{C}$ e $H=74\%$ com pouca luminosidade até 15 dias.

4.2.5 Inativação do fungo

Após 15 dias de crescimento do micélio, o material foi retirado da caixa e submetido a uma temperatura de 60°C durante 4 horas com circulação de ar segundo Bayer et al., (2008). Este procedimento pretende desidratar o biomaterial sem comprometer a sua integridade. Este processo de inativação do fungo é uma parte importante da metodologia uma vez que o micélio do fungo deixa de ser um organismo vivo e passa a ser parte integrante do biomaterial. Isto permite a utilização do biomaterial como isolamento estrutural sem correr riscos de contaminação de outros materiais construtivos.

4.3 OPTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS

As primeiras amostras apresentaram diversos problemas como:

- Desidratação rápida do substrato;
- Contaminação na amostra final (Figura 4.14);
- Problemas de crescimento do micélio (Figura 4.15);
- Falta de propagação do micélio em determinadas zonas do substrato, sendo na maior parte dos casos no fundo da caixa (Figura 4.15 e Figura 4.16);



Figura 4.14 Contaminação na amostra.



Figura 4.15. Amostra que apresenta problemas de crescimento do micélio e falta de propagação concentrada na zona onde esteve em contacto com fundo da caixa.



Figura 4.16. Amostra com um bom desenvolvimento do micélio, mas com falta de propagação concentrada.

O fungo *Pleurotus ostreatus* representa uma espécie com crescimento rápido e é amplamente utilizado em estudos piloto. O Quadro 4.1 resume alguns dos problemas, causas, e possíveis soluções na utilização de fungos para o desenvolvimento de um biomaterial.

Quadro 4.1. Quadro resumo da solução de problemas no cultivo de cogumelos (Sánchez, 2009).

Problemas	Causas	Soluções
Micélio não cresce; Crescimento lento do micélio; Micélio com mau cheiro, manchas ou contaminação;	Escolha errada do substrato; Mau spawn; Processo de inoculação errado; Concentração de nutrientes em determinadas zonas do substrato; Má esterilização do substrato ou do recipiente que contém o substrato; Elevada densidade no substrato, com poucos espaços vazios e que impedem a circulação natural de ar;	Utilizar novo spawn; Alteração da humidade relativa, temperatura, luminosidade, dióxido de carbono, etc; Verificação dos componentes do substrato; Inoculação em condições assépticas; Recipiente de inoculação com maior quantidade de ar; Maior controlo de temperatura e humidade; Misturar melhor o substrato.

Tendo por base esta informação e tendo em atenção os problemas identificados nas primeiras amostras, iniciou-se um processo de experimentação de uma nova metodologia. Sendo que para os problemas encontrados concluiu-se que existia necessidade de alterações na composição do substrato e no método de inoculação.

4.3.1 Aferição do substrato

Após a utilização individual de cada um dos aditivos no substrato foi possível concluir que: a utilização de palha de trigo revela-se bastante útil ao crescimento do fungo; a incorporação de biomassa conduziu a múltiplas contaminações; os substratos com farelo na sua composição revelaram contaminação no produto final. Quanto à hidratação do substrato, a adição de uma mistura de água e farinha revelou ter efeito contrário no crescimento do fungo.

Assim, a aferição do substrato passou pela eliminação do farelo e biomassa por maior percentagem de palha de trigo e hidratação.

A quantidade de spawn de 5-10%, recomendada por Bayer et al. (2008) e QuadranteNatural (2016), relevou-se insuficiente para o tempo de incubação pretendido. A aferição passou por considerar spawn 30 a 60% para o tempo de incubação curto de duas semanas.

O Quadro 4.2. resume a caracterização dos substratos aferidos.

Quadro 4.2. Substratos utilizados no processo final, em percentagem.

	Substrato (%)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Serradura	35	0	17,5	30	0	15	25	0	12,5
Spawn	30	30	30	40	40	40	50	50	50
Casca de arroz	0	35	17,5	0	30	15	0	25	12,5
Palha de trigo	35	35	35	30	30	30	25	25	25
Água (+30%)	X	X	X	X	X	X	X	X	X

4.3.2 Alteração do método de inoculação do fungo

No processo de inoculação anterior observou-se que as trocas gasosas entre o substrato e a atmosfera da sala condicionada provoca uma desidratação significativa nos primeiros dias de inoculação. Neste novo método a necessidade de retenção da humidade levou a que as caixas onde estão inseridos os substratos não sejam expostas diretamente ao ambiente da sala condicionada, mas sim a um microclima criado com recurso a sacos de plástico pretos. Isto vai permitir que o microclima criado dentro do saco seja contínuo dentro dos 15 dias de crescimento do micélio, diminuição da luminosidade, retenção da humidade, ambiente mais higiénico, sem risco de contaminação pelo ar, maior oxigenação das amostras consoante o ar que deixamos retido dentro do saco.

As caixas onde se inserem os substratos são perfuradas na tampa antes da inserção do mesmo, uma vez que queremos que se mantenham as trocas gasosas entre o substrato e a atmosfera envolvente. Para evitar o problema de concentração de micélio no topo da caixa é ao fim de 10-12 dias aberto o saco, todas as caixas são viradas ao contrário e perfuradas de maneira igual a que se perfurou a tampa. Procura-se assim que o fungo se desenvolva de maneira uniforme por toda a caixa.

Resumidamente, temos os seguintes passos de inoculação do substrato:

- Perfuração da tampa da caixa, onde de seguida se insere o substrato modificado e se fecha a tampa;
- Entre 6-10 caixas são inseridas em sacos pretos, onde são fechadas com algum ar retido. Estes sacos são armazenados na sala condicionada nas condições de temperatura e humidade já descritas;
- Ao fim de 10-12 dias são abertos os sacos, onde todas as caixas vão ser viradas ao contrário, perfuradas, inseridas novamente no saco e fechadas com algum ar retido no saco;
- Após o total de 15 dias de inoculação são retiradas as caixas, desenformadas as amostras e procede-se a inativação do fungo como já foi descrito anteriormente.

4.3.3 Alteração do método de inativação do fungo

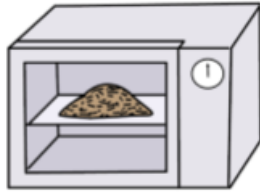
A fim de melhorar o processo de desidratação do material, com conseqüente aumento da densidade foi feita uma compressão das amostras antes de serem inseridas no forno de convecção. A compressão da amostra foi feita com recurso a uma prensa hidráulica, onde a amostra foi confinada dentro de um molde. A compressão foi feita de modo manual, com objetivo de obter amostras com 2,5 cm de espessura tendo resultado para cada tipo de amostra os valores representados no Quadro 4.3. No fim da compressão realizou-se o processo de secagem como já foi descrito anteriormente, resultando nas amostras representadas nas figuras A.1 a A.8.

Para melhor compreensão de todas as alterações ocorridas na metodologia inicial, é apresentada na Figura 4.17 uma esquematização de todo o procedimento para a obtenção do biomaterial.

Quadro 4.3. Espessuras das amostras finais resultantes da compressão.

Amostra	Mín. (cm)	Máx. (cm)	Méd. (cm)
A	-	-	-
B	2.50	2.66	2.57
C	2.14	2.36	2.26
D	2.12	2.66	2.22
E	2.51	2.31	2.56
F	2.13	2.32	2.21
G	2.12	2.60	2.25
H	2.43	2.41	2.52
I	2.43	2.60	2.52

Esterilização do substrato



1 Esterilização dos componentes a 60°C por 4 horas num forno de convecção.



Preparação do substrato



2 Adição dos sólidos (exceto o spawn) ao recipiente de mistura.



3 Misturar os componentes até obter uma mistura uniforme.



4 Adição do spawn e da água.



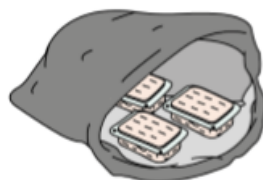
4 Misturar todos os componentes até estarem todos hidratados.



Inoculação do fungo



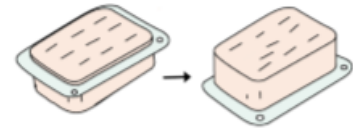
5 Deposição do substrato em caixas de polipropileno previamente perfuradas.



6 Inserção das caixas fechadas em sacos opacos e fechados com algum ar retido.



7 Armazenamento das caixas numa sala condicionada sujeitas a uma temperatura de 23°C e humidade relativa de 74%.



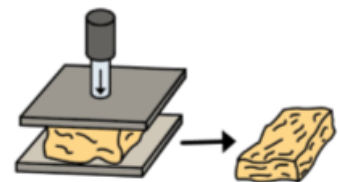
8 No fim de 10 a 12 dias são abertos os sacos onde são viradas as caixas e o seu topo é perfurado.



9 As caixas são novamente inseridas no saco, sendo armazenadas na sala condicionada até a um total de 15 dias de inoculação.



Inativação do fungo



10 As amostras são desenfomadas e sujeitas à compressão por uma prensa hidráulica, a fim de melhorar o processo de desidratação e aumentar a sua densidade.



11 Desidratação das amostras num forno de secagem com uma temperatura de 60°C durante 4h.

Figura 4.17. Sumário do procedimento para o desenvolvimento do biomaterial.

5 TESTES ANALÍTICOS

5.1 INTRODUÇÃO

Nos testes analíticos vai ser apresentado um método para caracterização do biomaterial quanto ao seu crescimento derivado do substrato modificado utilizado. É também descrito o procedimento utilizado para caracterização térmica do material.

5.2 ANÁLISE DO CRESCIMENTO DO MICÉLIO

A medição do crescimento do micélio é essencial para a compreensão de quais os fatores mais favoráveis para um crescimento rápido do micélio e como forma de controlar a decomposição do substrato.

A medição do crescimento do micélio é feita correntemente de duas formas:

- **Método físico:** observação da mudança no espaço da zona de crescimento apical da hifa ou variação do diâmetro durante um período de tempo.
- **Método químico:** medição de marcadores químicos específicos para cada tipo de fungo (Yang et al., 2011).

Os métodos de medição apresentados apenas se adaptam ao substrato de agar em laboratório. Na natureza ou na produção de fungos, com substratos que apresentam granulometrias semelhantes às lascas da madeira, apresentam erros elevados.

Yang et al. (2011) estudou um método não destrutivo através da análise de imagem com recurso ao *Spatial Analyt Tools* do programa ArcGIS. Este programa é utilizado para interpretação de imagens aéreas e de satélite e tem como objetivo a automatização do processo de extração da topografia para desenvolvimento de base de dados geográficos (Heipke et al., 2000).

Com objetivo mais prático resolveu-se utilizar o potencial do programa *MATLAB* para fazer a medição do crescimento do micélio tendo por base os mesmos princípios que o programa *ArcGIS*. A abordagem passa pela aquisição de imagem, processamento de imagem e processamento dos dados obtidos.

5.2.1 Aquisição e processamento de imagem

Segundo Yang et al. (2011) a imagem é obtida da superfície do recipiente como demonstra a Figura 5.1, com a utilização de uma máquina fotográfica. As imagens da nossa amostra são obtidas da superfície, após a compressão como está exemplificado na Figura 5.2. Uma vantagem do uso do *MATLAB* é que não existe limitação na resolução da imagem como acontece no programa *ArcGIS*, o que possibilita a utilização de vários tipos de ficheiro de imagem.

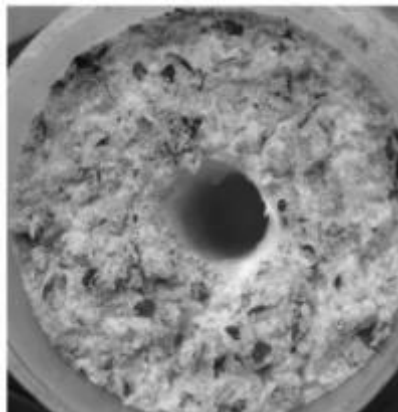


Figura 5.1. Superfície do recipiente do substrato inoculado (Yang et al., 2011).

A medida que o micélio vai se desenvolvendo no substrato, as hifas vão surgir à superfície do recipiente. Devido a coloração branca das hifas conseguimos distingui-las do substrato, podendo assim medir o nível de ocupação no substrato pelo fungo.

Como as imagens obtidas são a cores, estão divididas em três bandas: vermelho, verde e azul. Yang et al. (2011) obteve a sua imagem monocromática através da banda azul por ter um melhor contraste entre o micélio e o substrato. No *MATLAB* com o recurso à função *im2bw()* podemos converter automaticamente a imagem a cores para monocromática. Esta função permite que a imagem de saída tenha os pixels substituídos da imagem de entrada com uma luminosidade

superior a um nível imposto. Este nível encontra-se num intervalo que vai do 0 (branco) a 1 (preto). À semelhança de Yang et al. (2011), com a variação do nível de luminosidade, podemos ajustar a imagem de modo a obter o melhor contraste entre o micélio e o substrato. No *MATLAB* foram testados vários métodos de ajuste de imagem:

- **Método A:** utilização do nível padrão que o *MATLAB* aplica na função *im2bw()*, nível 0,5 (Figura 5.3).
- **Método B:** utilização da função *graythresh()* que automatiza a escolha do nível de luminosidade (Figura 5.4).
- **Método C:** edição de imagem através do programa *Adobe Photoshop Express*, onde se ajusta os níveis de contraste (+100), claridade (-100) e vibração (-100), ficando com uma maior diferenciação entre os brancos e os pretos (Figura 5.2). É depois utilizada a função *im2bw()* com o mesmo nível que o método A (Figura 5.5).
- **Método D:** utilização da imagem editada com os mesmos ajustes que o método C aplicando a função *graythresh()* no cálculo do nível de luminosidade como o método B (Figura 5.6).

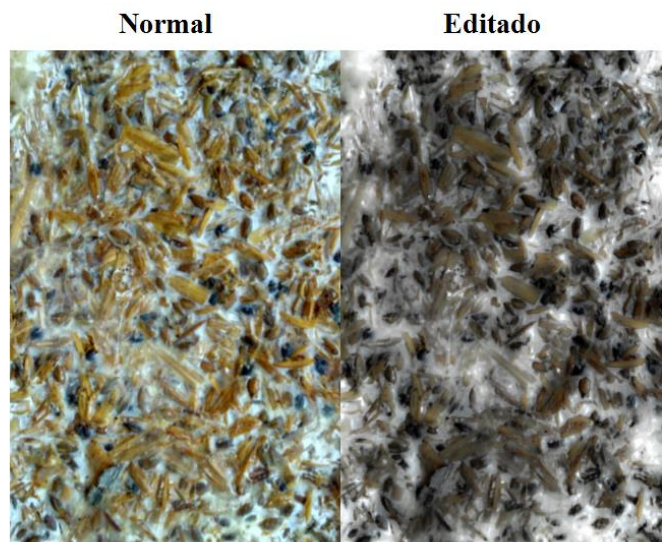


Figura 5.2. Imagem da superfície do substrato com edição e sem edição.

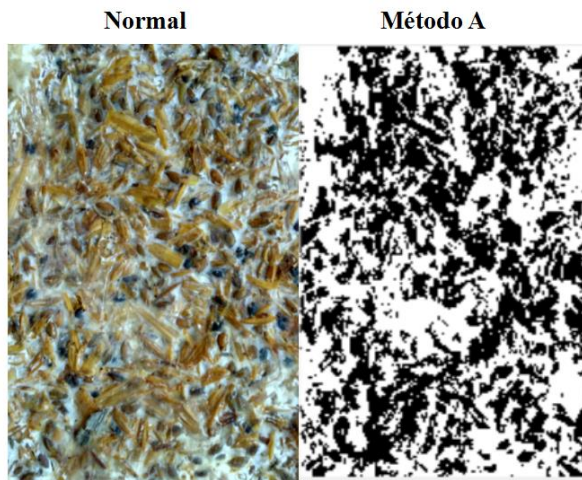


Figura 5.3. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do substrato B para monocromática através do método A.

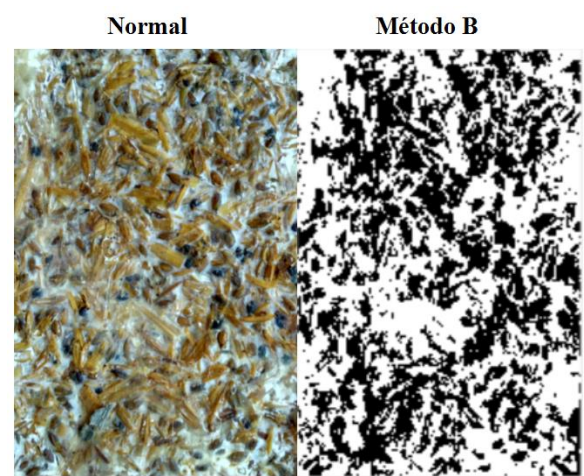


Figura 5.4. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do substrato B para monocromática através do método B.

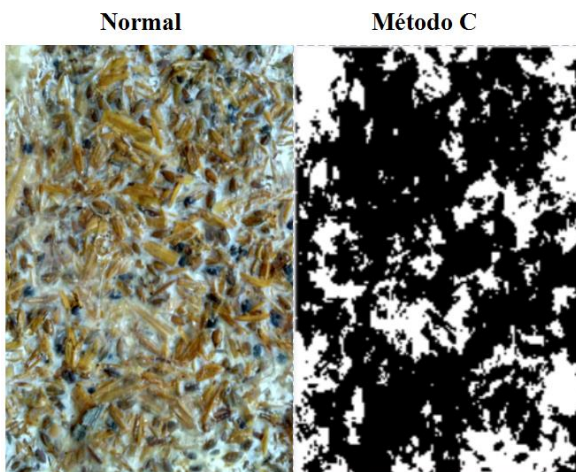


Figura 5.5. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do Substrato B para monocromática através do método C.

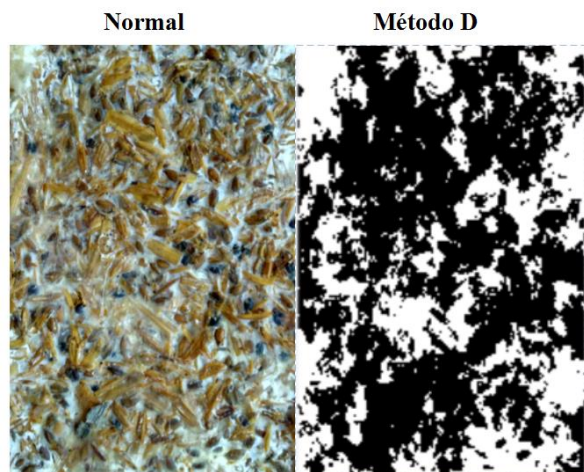


Figura 5.6. Conversão da imagem da superfície de uma amostra do Substrato B para monocromática através do método D.

Na análise dos diferentes métodos de conversão de imagem é possível identificar que o método A e B são os que fazem uma aproximação correta entre o micélio (branco) e o substrato (preto). Ao contrário do método C e D que apresentam zonas manchadas a preto. Estas manchas indicam que a edição de imagem antes da conversão da imagem a cores para monocromática provoca uma diminuição excessiva na luminosidade. Transformando zonas de tonalidade cinzenta

ocupadas por micélio em substrato (preto). Assim o método C e D devem ser excluídos por provocarem erros no cálculo da ocupação do fungo no substrato.

5.2.2 Aquisição de dados

Com a imagem monocromática definida podemos medir a percentagem de ocupação do micélio no substrato através da percentagem de pixels brancos. Esta percentagem pode ser obtida por:

$$P_B = \frac{N_T - N_P}{N_T} \quad (5.1)$$

Em que:

N_P – É o número total de pixels pretos dado pela expressão *sum()* do programa *MATLAB*.

N_T – É o número total de pixels encontrados na imagem dado pela expressão *sum()* do programa *MATLAB*.

P_B – Proporção de micélio no substrato.

Resultando assim os valores da percentagem de ocupação de fungo apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1. Percentagem de ocupação do fungo para cada tipo de metodologia.

		Método			
		A	B	C	D
Substratos	A	-	-	-	-
	B	53.67	56.13	31.67	38.45
	C	75.7	63.65	61.41	54.87
	D	68.65	64.72	50.39	54.6
	E	78.73	64.40	68.37	60.89
	F	66.22	62.40	41.39	47.9
	G	88.44	64.66	91.33	72.53
	H	79.06	64.13	62.97	54.5
	I	67.31	64.19	47.21	52.77
	J	70.85	60.38	60.13	54.73

Os resultados obtidos permitem concluir que este método é uma boa ferramenta tal como o método criado por Yang et al. (2011) . Esta metodologia permite obter os resultados de uma

forma direta, com vários métodos de conversão, permitindo fazer a seleção dos que mais se ajustam a realidade.

5.3 MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A principal propriedade de um material para produção de um isolamento térmico é a condutividade térmica (λ , expressa em $W/(mK)$ ou $W/(m^{\circ}C)$), que caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogêneos. Representa a quantidade de calor (expressa em W por m^2) que atravessa uma espessura unitária (m) de um material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura ($1^{\circ}C$ ou $1K$) (Santos e Matias, 2006).

Os ensaios realizados para medição da condutividade térmica tiveram em conta o equipamento disponível no laboratório do departamento, do tamanho das amostras e do estado de desenvolvimento do trabalho. Existem muitos outros equipamentos que possibilitam a medição da condutividade térmica de forma mais direta e precisa que o utilizado. Mas neste caso era necessário que o estado de desenvolvimento do trabalho estivesse numa fase mais avançada que permitisse que o processo de ensaio fosse mais económico. Como neste trabalho estamos numa fase inicial do desenvolvimento do produto a medição da condutividade térmica vai ser realizada através do método Transient Plane Source (TPS) com recurso ao equipamento *Hot Disk TPS 2500 S*. Este aparelho tem a vantagem de fazer medições de amostras de dimensões reduzidas e anisotrópicas o que é ideal para medir a condutividade térmica no nosso trabalho.

O sensor da *Hot Disk* consiste num padrão em forma de dupla espiral desenhado numa fina folha de papel com um material condutor. Vamos utilizar para o nosso tipo de material um sensor envolvido num material isolante Kapton, ilustrado na Figura 5.7, que é específico para materiais de isolamento que podem receber temperaturas até $300^{\circ}C$.

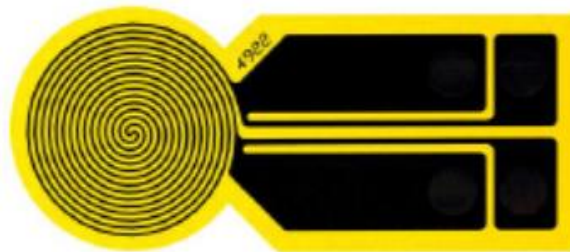


Figura 5.7. Sensor *Hot Disk Kapton 4922*.

A montagem do equipamento para a medição dos parâmetros térmicos é realizada através da inserção do sensor entre duas amostras do material que queremos testar como demonstra a Figura 5.8.



Figura 5.8. Montagem dos provetes para a medição da condutividade térmica.

Foi recomendado pelo assistente da empresa a utilização de um sensor *Hot Disk Kapton 4922*, tendo em atenção os seguintes aspetos:

- **Dimensão da amostra:** devido ao sensor, na solução da equação de condutividade térmica, se basear no pressuposto que o mesmo está localizado num meio infinito é importante garantir dimensões mínimas de espessura e de diâmetro da amostra. É recomendado que a espessura seja superior ao raio do sensor e que o diâmetro da amostra seja duas vezes superior ao diâmetro. Tendo o sensor escolhido um raio de 1,46 cm, a espessura do material tem que ser superior a este valor e o diâmetro superior a 5,84 cm. Depois de comprimidas as amostras as dimensões dos provetes ficaram com espessuras no intervalo [2,12;2,66] cm e o menor comprimento é de 9 cm.
- **Localização do sensor:** é importante garantir que o sensor fique centrado na amostra.
- **Face de contacto:** em materiais anisotrópicos o plano do sensor deve ser perpendicular a direção axial da amostra.
- **Tempo entre medições sucessivas:** deve ser feito um intervalo de no mínimo 15 minutos entre cada amostra de modo a restabelecer a temperatura da amostra para a temperatura ambiente.

A medição da condutividade térmica é realizada pelo processo de materiais anisotrópicos (*bulk type I*), sendo que para este tipo de medição é necessário a introdução do calor específico do tipo de material a ser testado. O técnico recomendou a utilização de dois procedimentos para o cálculo deste valor. O primeiro método é através de ensaios isotrópicos ao material em estudo, sendo que este valor só é plausível se o nível de anisotropia for baixo. O segundo método, por se tratar de um material novo e em desenvolvimento, é a utilização de um valor do calor específico de um material semelhante.

Foi testada a veracidade do primeiro método para a obtenção do calor específico e concluiu-se que não é possível a sua aplicação no nosso material. A exclusão destes valores deve-se ao fato dos mesmos estarem associados a valores da condutividade térmica negativos ou de ordem de grandeza elevada. É fisicamente impossível obter um material com condutividade térmica negativa e, para o caso de estudo, obter valores de ordem de grandeza que ultrapassem a unidade.

Assim optou-se por utilizar um valor de $1,035 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, valor do calor específico para a lã de madeira (Haunte-Loire, 2012). . Apesar de se utilizar um valor estimado para o calor específico, é dito pelo técnico da *Hot Disk* que para esta fase é normal recorrer a esta metodologia dando resultados com uma aproximação razoável.

Para cada amostra foram realizados dois ensaios de medição da condutividade térmica. Um dos ensaios realizou-se depois do processo de inativação do fungo, em que denominamos de **amostras pouco secas**. O outro que se realiza após secagem do biomaterial, que denominamos de **amostras secas**. A secagem do produto é feita num forno de convecção durante 6 horas a 60°C . Com estas duas medições pretende-se obter o comportamento das amostras em relação ao teor de água nela contido.

Para saber a quantidade de água que se perde neste processo foram pesadas as amostras no fim dos processos descritos anteriormente. Obteve-se assim uma percentagem média de perda de água de -22% como demonstrado no Quadro 5.2.

Para cada substrato com os valores das massas, das espessuras média e da área da caixa (117 cm^2) permitiu o cálculo das densidades para cada amostra antes e depois do processo de secagem. Estes valores estão demonstrados no Quadro 5.3.

Quadro 5.2. Percentagem de perda de água no biomaterial, após processo de secagem.

Amostra	Massa (g) Pouco seco			Massa (g) Seco			% de perda de água
	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média (
A	-	-	-	-	-	-	-26
B	103	107	105	74	81	77	-24
C	87	94	91	66	71	69	-22
D	88	93	91	70	73	71	-25
E	84	96	90	72	61	67	-20
F	93	98	96	76	77	77	-17
G	123	128	125	99	108	103	-23
H	105	130	117	78	102	90	-21
I	92	99	95	73	77	75	-15
J	121	129	125	105	107	106	-22
						Média (%)	-22

Quadro 5.3. Densidade das amostras antes e após o processo de secagem.

Amostra	Densidade (kg/m ³) Pouco seco			Densidade (kg/m ³) Seco		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
A	-	-	-	-	-	-
B	341	356	348	246	268	257
C	329	358	343	251	268	260
D	341	360	350	268	282	275
E	279	320	299	242	205	223
F	360	381	371	295	298	296
G	468	485	477	377	409	393
H	355	441	398	266	347	307
I	314	335	324	249	263	256
J	448	479	463	389	397	393

O software da *Hot Disk* dá-nos os valores da condutividade térmica para cada amostra na direção axial e radial. No Quadro 5.4 estão representados os valores médios para cada amostra, no fim da realização de 5 ensaios. Em anexo, nos quadros A.4 e A.5, estão os resultados dos ensaios para as amostras pouco secas e secas respetivamente.

Quadro 5.4. Condutividade térmica axial e radial média para os diferentes tipos de substrato.

Amostra	Pouco seco		Seco	
	Cond. térmica axial média (W/mK)	Cond. térmica radial média (W/mK)	Cond. térmica axial média (W/mK)	Cond. térmica radial média (W/mK)
B	0.140	0.733	0.066	0.839
C	0.056	0.941	0.068	0.378
D	0.124	0.236	0.117	0.249
E	0.098	0.238	0.105	0.323
F	0.034	2.262	0.042	1.540
G	0.069	1.845	0.098	0.841
H	0.277	0.225	0.094	0.229
I	0.122	0.248	0.072	0.258

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos dos testes descritos no capítulo anterior, tendo por pressuposto que se pretendeu perceber a variação das propriedades consoante os seguintes fatores:

- Aumento da percentagem de spawn.
- Variação de dois compostos principais, nutritivos e com capacidade benéfica ao isolamento térmico que são a casca de arroz e a serradura.
- Diminuição do teor de humidade.

Vai ser discutido a veracidade dos resultados, a qualidade das amostras obtidas e por fim é feita uma comparação com isolamentos já existentes no mercado, como também com materiais já referidos no subcapítulo 2.2.5.

6.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

6.2.1 Medição do crescimento do micélio

Dos métodos A, B, C e D usados na medição do crescimento do micélio, existem diferenças significadas para a percentagem de ocupação do fungo para um mesmo substrato. Como vimos, os métodos C e D apresentam zonas manchadas a preto, que provocam erros no cálculo da ocupação do fungo no substrato. Assim, os resultados mais corretos resultam da média de valores entre o método A e o B. apresentados no Quadro 6.1. Para melhor compreensão dos resultados expostos nos quadros deste capítulo é feita uma esquematização apresentada no Quadro 6.2.

Quadro 6.1. Percentagem de ocupação do micélio nos diferentes tipos de substrato.

Ocupação do micélio (%)		
A	B	C
-	54,90	69,68
D	E	F
66,79	71,57	64,31
G	H	I
76,55	71,59	65,75

Quadro 6.2. Esquematização das variações realizadas nos substratos.

composto principal	Serradura	Casca de arroz	Mistura (50%/50%)
Aumento da % de Spawn ↓	A 30%	B 30%	C 30%
	D 40%	E 40%	F 40%
	G 50%	H 50%	I 50%

Yang et al. (2011) estudou a evolução da percentagem de ocupação para um período de 6 dias com variações na temperatura e humidade relativa no processo de inoculação do fungo obtendo resultados satisfatórios. Para temperatura e humidade relativa mais próximas dos ideais para o crescimento do micélio obteve uma maior percentagem de ocupação e uma maior velocidade de crescimento.

Neste trabalho, fazer uma análise para um intervalo de tempo não é possível uma vez que a fase de inoculação é feita num ambiente fechado de modo a criar as melhores condições de crescimento. Assim, a análise foi feita apenas no fim do processo de inoculação (15 dias) e de compressão das amostras.

Seria de esperar nos nossos resultados que uma maior percentagem de spawn conduz a uma maior ocupação de micélio na amostra final. No entanto, tal só ocorre para substratos com o mesmo composto principal de D para G e B para E, sendo que para amostras de mistura o valor manteve-se aproximadamente constante para as diferentes percentagens de spawn.

Assim, estes resultados em comparação com os de Yang et al. (2011) (Figura 6.1) podem significar que a partir de certos valores da percentagem de spawn e a partir de um determinado período de tempo o valor da ocupação do micélio chega a um valor máximo. Isto pode ser

justificado pela fase de crescimento exponencial chegar ao seu limite devido à insuficiência de um nutriente essencial no substrato modificado ou por existir um nível inibidor dos subprodutos metabólicos (Deacon, 2005). Isto indica que é necessário explorar esta ferramenta criando uma metodologia nova que permita fazer a medição da percentagem de ocupação do fungo ao longo do período de inoculação. Podendo assim permitir estudar a curva de crescimento do micélio face à degradação do substrato modificado.

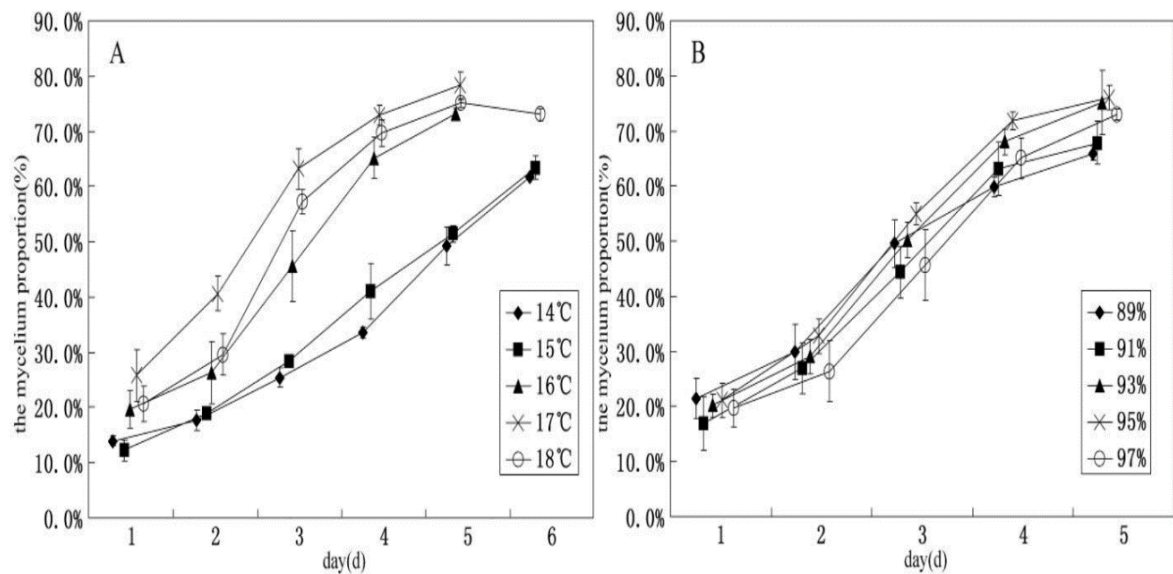


Figura 6.1. Crescimento de *Pleurotus eryngii* incubado a diferentes temperaturas (A) e humidade relativa (B) (Yang et al., 2011).

6.2.2 Medição da condutividade térmica

Neste trabalho tentou-se perceber a variação das propriedades térmicas com o aumento do teor de humidade, mas tal não foi possível de se concretizar. Sendo necessário fazer uma avaliação dos quadros 6.3 e 6.4, que apresentam os valores da densidade média antes e depois da secagem para cada tipo de amostra. Como também dos quadros 6.5 e 6.6, que apresentam os valores da condutividade térmica média antes e depois do processo de secagem.

É dito pelo técnico que em certos materiais não é possível visualizar esta variação e pode ser justificado pelas seguintes observações feitas nos resultados obtidos:

- **Densidade/condutividade térmica:** é de esperar que para um isolamento térmico o aumento de densidade do material diminua a condutividade térmica. Fazendo esta comparação para as amostras secas (Quadro 6.4 com Quadro 6.6) observamos que esta relação se verifica para sete das oito amostras medidas. Sendo que a amostra H não verifica por motivos descritos posteriormente. Nas amostras pouco secas (Quadro 6.3 com Quadro 6.5) esta relação já não se verifica para as amostras que contêm como substrato principal a casca de arroz.
- **Teor de humidade/condutividade térmica:** neste caso o aumento do teor de humidade de uma amostra leva a um aumento da condutividade térmica. Comparando os resultados para as amostras secas e pouco secas (Quadro 6.5 com Quadro 6.6) é verificado que para as amostras C, E, F e G tal não se verifica.

Podemos concluir assim que os resultados da condutividade térmica para amostras com algum teor de humidade não são plausíveis, sendo necessário fazer este calculo através de uma metodologia alternativa.

Quadro 6.3. Densidade média das amostras pouco secas.

Densidade média (kg/m ³) Pouco seco		
A	B	C
-	348	343
<hr/>		
D	E	F
350	299	371
<hr/>		
G	H	I
477	398	324

Quadro 6.4. Densidade média das amostras secas.

Densidade média (kg/m ³) Seco		
A	B	C
-	257	260
<hr/>		
D	E	F
275	223	296
<hr/>		
G	H	I
393	307	256

Quadro 6.5. Condutividade térmica axial média das amostras pouco secas.

Condutividade térmica média (W/mK) Pouco seco		
A	B	C
-	0,140	0,056
<hr/>		
D	E	F
0,124	0,098	0,034
<hr/>		
G	H	I
0,069	0,277	0,122

Quadro 6.6. Condutividade térmica axial média das amostras secas.

Condutividade térmica média (W/mK) Seco		
A	B	C
-	0,066	0,068
<hr/>		
D	E	F
0,117	0,105	0,042
<hr/>		
G	H	I
0,098	0,094	0,072

6.3 DEGRADAÇÃO DO FUNGO/SUBSTRATO

Foi observado que existem diferenças de degradação do fungo para os diferentes tipos de substrato. Em substratos que o principal composto é a serradura observou-se que é a partir de valores de 40% de spawn na composição final do substrato que o fungo consegue cumprir a sua função de agregador do material. Exemplo disso foi o facto de nas amostras A não ser possível a realização de qualquer medição, uma vez que a amostra final se desintegrava completamente ao ser retirada da caixa. Este défice de crescimento do fungo pode ser causado pela serradura ser de difícil degradação por parte do fungo. Assim sendo é necessária uma grande quantidade de spawn para fazer a degradação do material para um mesmo período de tempo que para os outros casos. É verificado no Quadro 6.6 que as amostras G (50% de spawn) obtiveram os melhores resultados de condutividade térmica, devido a percentagem de spawn levar a que a amostra final tenha uma densidade superior. Isto verifica-se pelo simples facto de existir uma maior ocupação dos espaços vazios por parte do fungo (maior percentagem de ocupação do fungo). O valor da condutividade térmica média para a amostra G é de 0,098 W/mK, o que neste caso permite concluir que uma maior percentagem de micélio na amostra final conduz a um melhor resultado.

Quanto aos substratos que têm como principal composto a casca de arroz observou-se que o fungo consegue cumprir a sua função para todos os casos de concentração de spawn testados. Mas observou-se que em amostras com 50% de composição de spawn é, depois da compressão do material, obtida uma desintegração do material como se observa na Figura 6.2. Esta desintegração pode ser a justificação para os resultados incorretos observados anteriormente. O melhor resultado neste caso observou-se para as amostras B (30% de spawn), com um valor de condutividade térmica média de 0,066 W/mK, o que permite concluir que para uma maior percentagem de casca de arroz no substrato a condutividade térmica da amostra melhora em função da percentagem de micélio.



Figura 6.2. Amostra H, com 50% de spawn na composição final.

Nos substratos onde existe a mistura dos dois componentes principais com uma relação entre si de 50/50 foi onde se observaram os melhores resultados. Tal como nas amostras anteriores o fungo desenvolveu-se para todos os casos de concentração estudados, mas para uma mesma concentração de spawn (50%) começou a observar-se uma ligeira desintegração localizada como observado na Figura A.8. Esta desintegração sendo localizada não afetou significativamente os resultados, pois como se localiza nos bordos da amostra a onda térmica não a vai alcançar. O melhor resultado para este tipo de substrato foi para um equilíbrio entre as diferentes quantidades de composto principal, onde a condutividade térmica média apresenta o valor de 0,042 W/mK.

Assim, resumidamente, para cada tipo de componente principal podemos tirar algumas indicações que estão listadas no Quadro 6.7.

Quadro 6.7. Resumo das observações dos resultados para os diferentes tipos de substratos.

	Serradura	Casca de arroz	Mistura
Micélio vs Componentes principais	Maior concentração de micélio → melhor condutividade térmica	Maior concentração de casca de arroz → melhor condutividade térmica	Equilíbrio de concentrações dos componentes → melhor condutividade térmica
Resistência aparente	Melhor resistência (muito fibroso)	Menor resistência (menos fibroso e menor dimensão das partículas)	Razoável resistência (fibroso)
Micélio vs Função	Necessário uma maior quantidade de micélio para o fungo agregar os componentes	Necessário menor quantidade de micélio para o fungo agregar todos os componentes	Necessário menor quantidade de micélio para o fungo agregar todos os componentes
Condutividade térmica	Pior resultado para a condutividade térmica 0,098 W/(mK)	Resultado razoável para a condutividade térmica 0,066 W/(mK)	Melhor resultado para a condutividade térmica 0,042 W/(mK)
Densidade	Para um melhor resultado → elevada densidade 393 kg/m ³	Para um melhor resultado → menor densidade 257 kg/m ³	Para um melhor resultado → elevada densidade 296 kg/m ³

6.4 RESULTADOS FINAIS

O melhor resultado obtido é uma combinação de capacidades térmicas de todos os materiais, onde foi obtido um valor estimado para a condutividade térmica de 0,042 W/mK. Este substrato F contém na sua composição 15% de serradura, 15% de casca de arroz e 30% de palha de trigo, sendo inoculado com 40% de spawn de *Pleurotus ostreatus*. Este material para além da capacidade de isolamento térmico pode, através da sua constituição, ter capacidades acústicas e de retenção ao fogo.

No Quadro 6.8 estão apresentados valores para a condutividade térmica e densidade de diferentes materiais de isolamento térmico. Para os materiais mais comuns estes valores foram calculados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, sendo os restantes valores obtidos da revisão bibliográfica. Comparando o nosso biomaterial com os materiais existentes no mercado como o EPS, XPS e PIR (Quadro 6.8), é evidente a enorme densidade (10 vezes superior) para conseguir obter os mesmos resultados térmicos. Claro que em termos de redução da energia incorporada nos materiais, consegue-se reduzir o seu valor sem que seja posto em causa a redução da energia operacional dos edifícios. Além disto, ainda é possível promover o aproveitamento de resíduos agroflorestais com o benefício de que estes não apresentem toxicidade, promoverem a reflorestação e permitem que o material seja biodegradável.

Se fizermos uma comparação do nosso biomaterial com o material mais próximo (*Mushroom® Insulation and Acoustics*) concluímos que ainda necessitamos de muito trabalho para conseguirmos chegar a uma solução competitiva. Existe uma clara diferença no aspeto da amostra, sendo visível para o biomaterial desenvolvido pela empresa Ecovative que o fungo tem uma maior participação na composição final, um melhor comportamento térmico e boa capacidade resistente.

Os resultados recentes confirmam um futuro promissor para otimização e desenvolvimento dos materiais à base de micélio. Haneef et al. (2017) demonstram que as características do substrato influenciam as propriedades do micélio de fungos de decomposição⁴ branca, *Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum*, dois fungos de decomposição branca, nomeadamente as propriedades mecânicas. As diferenças nas propriedades explicam-se pelas características dos

⁴ Decomposição ou podridão

metabolitos sintetizados pelos fungos decorrentes do substrato que serviu de alimento. A complementaridade de estudos de microscopia com testes analíticos é relevante para caracterizar o processo e o produto final, relacionados com a resistência e o comportamento térmico do biomaterial, algo que será importante na aferição do biomaterial em estudo. Para o mesmo objetivo torna-se também necessário compreender a variação destas propriedades que a adição de novos componentes fibrosos, fibras de origem vegetal (cânhamo, linho, coco), proporcionam no biomaterial.

Ainda assim é possível concluir que a utilização do fungo para criar um biomaterial é um processo que pode ter um enorme valor industrial. O fungo tem uma grande flexibilidade no substrato em que se desenvolve, permitindo que sejam criados materiais com diferentes características, apenas variando os seus constituintes. O fungo é, com uso racional, um recurso inesgotável, renovável e que permite aumentar o valor de mercado do material em estudo.

Quadro 6.8. Condutibilidade térmica de materiais isolantes (Santos e Matias, 2006, Wei et al., 2015, Ecovative, 2016).

Material	Densidade aparente (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/mK)
Lã de rocha	35-100	0,040
Lã de vidro	15-100	0,040
Aglomerado de cortiça expandida	90-140	0,045
EPS	15-20	0,040
XPS	25-40	0,037
PIR (placas)	20-50	0,040
Madeiras leves	435-565	0,150
Madeiras densas	750-870	0,230
Painel de fibras da madeira	250	0,070
Lã de madeira (ligante hidráulico)	250-350	0,10
RSTIB (painéis de casca de arroz)	250	0,051-0,053
<i>Mushroom® Insulation and Acoustics</i>	122	0,039

7 CONCLUSÃO

Neste estudo foi trabalhada uma metodologia para desenvolvimento de um biomaterial para isolamento térmico com recurso a resíduos agroflorestais e micélio.

Os constituintes do substrato modificado foram selecionados tendo por base a sua disponibilidade em Portugal, a região Centro em particular. A primeira fase do estudo envolveu a exploração do comportamento dos materiais, nomeadamente o crescimento do fungo selecionado: *Pleurotus ostreatus* a partir dos resíduos agroflorestais e aditivos. A segunda fase do estudo compreendeu a avaliação do comportamento dos materiais após a aferição dos constituintes que proporcionaram melhores resultados. Foram realizadas avaliações da condutividade térmica, relacionadas com a variação da densidade, composição e percentagem de micélio.

Como primeiro estudo nesta área foi possível obter resultados prometedores relativamente à densidade do biomaterial. Haneef et al. (2017) demonstram no seu trabalho com *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus*, que a variação dos nutrientes constituintes do substrato proporciona diferenças nas propriedades estruturais do micélio no final do seu desenvolvimento. Isto significa que através da escolha dos constituintes do substrato modificado podemos influenciar as propriedades do micélio, influenciando diretamente as características finais do biomaterial. Assim é necessário mais testes futuros para melhorar as propriedades de resistência e conseguir uma melhor segurança no desenvolvimento do material.

A metodologia trabalhada para a medição da percentagem de micélio requer reprodução dos testes para garantir um número de ensaios que contribua para atestar os resultados possível avaliação da rentabilidade do processo de desenvolvimento do biomaterial.

O método usado na avaliação da condutividade térmica, *Hot Disk*, relevou ser bastante rápido e económico para esta fase do processo. No futuro será importante comparar a condutividade térmica com outros métodos, igualmente robustos, para a validação do processo.

No seguimento deste estudo será necessário aprofundar todas as técnicas trabalhadas e melhorar o produto final, uma vez existem poucos dados analíticos disponíveis. Assim, propõe-se para trabalhos futuros as seguintes temáticas:

- Comparação dos resultados obtidos para o biomaterial a partir da avaliação da condutividade térmica com outras metodologias;
- Comparação do crescimento do micélio considerando várias espécies de fungos e substratos/aditivos com vista a melhorar a rentabilidade do processo;
- Desenvolvimento de diferentes tipos de substratos com a adição de matéria primas fibrosas que melhorem a resistência mecânica do biomaterial;
- Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do micélio, e do biomaterial, através de técnicas de microscopia;
- Estudo do efeito da humidade no desenvolvimento do biomaterial, verificando a inatividade do fungo no tempo, mas também a durabilidade e possíveis contaminações;
- Estudo de propriedades mecânicas, acústicas, e de resistência ao fogo, para maior eficiência do biomaterial (e processo de desenvolvimento).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archiproducts (2016). <http://www.archiproducts.com/pt>. Portugal.

Bayer, E., G. McIntyre e B. L. Swersey (2008). Method for producing grown materials and products made thereby. US 2008/0145577 A1, 19 Jun. 13 p.

Biswas, K., S. S. Shrestha, M. S. Bhandari e A. O. Desjarlais (2016). "Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts." *Energy and Buildings*, Vol. 112, pp. 256-269.

Bonatti, M., P. Karnopp, H. M. Soares e S. A. Furlan (2004). "Evaluation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus sajor-caju* nutritional characteristics when cultivated in different lignocellulosic wastes." *Food Chemistry*, Vol. 88, Issue 3, pp. 425-428.

Cabeza, L. F., C. Barreneche, L. Miró, J. M. Morera, E. Bartolí e A. Inés Fernández (2013). "Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, pp. 536-542.

Cachim, P. (2007). "Construções em Madeira - A madeira como material de construção". Publindústria, Aveiro.

Carlile, M. J., S. C. Watkinson e G. W. Gooday (2004). "The Fungi". Bath Press, Avon, Great Britain.

Carvalho, W., L. Canilha, A. Ferraz e A. M. F. Milagres (2009). "Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira." *Química Nova*, Vol. 32, pp. 2191-2195.

CORDIS (2016). Sustainable techno-economic solutions for the agricultural value chain. Project ID: 690142.

Costa, E. (1974). "Física Aplicada à Construção Conforto Térmico". Co-edições urgs, Brasil.

Deacon, J. (1997). "Introduction to Modern Mycology". Blackwell Scientific University.

Deacon, J. (2005). "Fungal Biology". Blackwell Publishing Ltd, University of Edinburgh UK.

Ding, G. (2004). "The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities". Doctor of Philosophy, University of Technology, Sydney, Sydney,

- Ecovative (2016). <http://www.ecovatedesign.com/>. Ecovative Design, Nova Iorque.
- Eires, R., S. Jalali e A. Camões (2010). "Novos compósitos eco eficientes para aplicações não estruturais na construção."
- EPA (2016). <https://www.epa.gov/green-engineering/about-green-engineering#principles>. Environmental Protection Agency, EUA.
- EPA (2016). <https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/transportation.html>. Environmental Protection Agency, EUA.
- Erkel, E. I. (2009). "The effect of different substrate mediums on yield of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst." *J Food Agric Environ*, Vol. 7, pp. 841-844.
- Eurostat (2016). http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy#Consumption. Eurostat Statistics Explained, UE.
- Ferreira, W. F. C. e J. C. F. d. Sousa (2000). "Microbiologia". Lidel - edições técnicas, lda, Lousã.
- Greenspec (2016). <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-oil-derived/>. Greenspec, Reino Unido.
- Haneef, M., L. Ceseracciu, C. Canale, I. S. Bayer, J. A. Heredia-Guerrero e A. Athanassiou (2017). "Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties." *Scientific Reports*, 7, 41292.
- Hatakka, A. e K. E. Hammel (2011). "Fungal biodegradation of lignocelluloses". *Industrial applications*, Springer: pp. 319-340.
- Haute-Loire (2012). "Guide des Materiaux Isolants", Le Puy en Relay.
- Heipke, H., K. Pakzad e B. M. Straub (2000). "Image Analysis for GIS Data Acquisition." *The Photogrammetric Record*, Vol. 16, Issue 96, pp. 963-985.
- Holt, G. A., G. McIntyre, D. Flagg, E. Bayer, J. D. Wanjura e M. G. Pelletier (2012). "Fungal Mycelium and Cotton Plant Materials in the Manufacture of Biodegradable Molded Packaging Material: Evaluation Study of Select Blends of Cotton Byproducts." *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, Vol. 6, Issue 4, pp. 431-439.
- IEA (2015). <http://www.iea.org/statistics/>. Key World Energy Statistics França.
-

INE (2016). "Estatísticas Agrícolas 2015", Portugal.

Kavanagh, K. (2011). "Fungi: Biology and Applications". Wiley-Blackwell, Department of Biology National University of Ireland Maymooth.

Miles, P. G. e S.-T. Chang (2004). "Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact". CRC press.

Nevalainen, H. e R. Peterson (2014). "Making recombinant proteins in filamentous fungi- are we expecting too much?" *Frontiers in Microbiology*, Vol. 5.

Panyakaew, S. e S. Fotios (2008). "321: Agricultural Waste Materials as Thermal Insulation for Dwellings in Thailand: Preliminary Results."

Pérez-Lombard, L., J. Ortiz e C. Pout (2008). "A review on buildings energy consumption information." *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue 3, pp. 394-398.

Piškur, B., M. Bajc, R. Robek, M. Humar, I. Sinjur, A. Kadunc, P. Oven, G. Rep, S. Al Sayegh Petkovšek, H. Kraigher, D. Jurc e F. Pohleven (2011). "Influence of *Pleurotus ostreatus* inoculation on wood degradation and fungal colonization." *Bioresource Technology*, Vol. 102, Issue 22, pp. 10611-10617.

QuadranteNatural (2016). <http://www.quadrante-natural.pt/Produtos/PP%20380.pdf>. Quadrante Natural - laboratório de produção de micélio para cogumelos, Portugal.

Salsa, J. (2004). http://www.cientic.com/tema_fungo_img2.html. CienTIC, Portugal.

Sánchez, C. (2009). "Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms." *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 85, Issue 5, pp. 1321-1337.

Santos, C. e L. Matias. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. *ITE* 50.

Scrase, R. (1996). "Cultivating mushrooms: Making composted and non-composted substrates." *Mycologist*, Vol. 10, Issue 2, pp. 52-55.

Silva, F. (2013). "Estudo de Materiais de isolamento térmico inovadores". Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Porto,

Thormark, C. (2002). "A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential." *Building and Environment*, Vol. 37, Issue 4, pp. 429-435.

Torgal, P. e S. Jalali (2010). "A Sustentabilidade dos Materiais de Construção". Gráfica Vilaverdense - Artes Gráficas, Lda, Portugal.

Travaglini, S., J. Noble, P. Ross e C. Dharan (2013). "Mycology Matrix Composites Proceedings of the American Society for Composites", Berkeley California.

Wei, K., C. Lv, M. Chen, X. Zhou, Z. Dai e D. Shen (2015). "Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing." *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 116-122.

Yang, J., J. Zhao, Q. Guo, Y. Wang e R. Wang (2011). Data Acquisition Method for Measuring Mycelium Growth of Microorganism with GIS. Computer and Computing Technologies in Agriculture IV: 4th IFIP TC 12 Conference, CCTA 2010, Nanchang, China, October 22-25, 2010, Selected Papers, Part I. D. Li, Y. Liu e Y. Chen. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 374-380.

ANEXO A – Substratos

Quadro A.1. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.

	Substrato (%)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Serradura	60	70	80	57	66	76	0	0	0	0	0	15	50	15	95
Farelo	35	25	15	33	24	14	0	0	0	0	0	5	5	5	0
Spawn	5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5
Casca de arroz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	15	25	0
Palha de trigo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	50	0
Biomassa A	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa B	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa C	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0
Biomassa D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0
Biomassa E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0
Água (+30%)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Água com farinha (+30%)															

Quadro A.2. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.

	Substrato (%)														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Serradura	0	0	15	50	20	48	48	0	43	43	0	0	0	40	20
Farelo	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	0
Spawn	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10
Casca de arroz	95	0	50	20	25	48	0	48	43	0	43	45	40	0	20
Palha de trigo	0	95	25	25	50	0	48	48	0	43	43	50	50	50	50
Biomassa A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Água (+30%)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Água com farinha (+30%)															

Quadro A.3. Composição dos substratos iniciais, em percentagem.

	Substrato (%)											
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Serradura	0	40	20	0	40	20	20	20	20	20	20	20
Farelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spawn	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Casca de arroz	40	0	20	40	0	20	20	20	20	20	20	20
Palha de trigo	50	50	50	50	50	50	25	25	25	25	25	25
Biomassa A	0	0	0	0	0	0	25	0	0	25	0	0
Biomassa B	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	25	0
Biomassa C	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	25
Biomassa D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Água (+30%)										X	X	X
Água com farinha (+30%)	X	X	X	X	X	X	X	X	X			



Figura A.1. Amostra B.



Figura A.2. Amostra C



Figura A.3. Amostra D



Figura A.4. Amostra E



Figura A.5. Amostra F.



Figura A.6. Amostra G.



Figura A.7. Amostra H.



Figura A.8. Amostra I

Quadro A.4 Resultado dos ensaios do Hot Disk para as amostras pouco secas.

Amostra	Cond. Térmica (W/mK)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média	Desvio Padrão
B	axial	0,147	0,141	0,142	0,142	0,129	0,140	0,006
	radial	0,630	0,713	0,711	0,718	0,891	0,733	0,085
C	axial	0,054	0,055	0,054	0,058	0,059	0,056	0,002
	radial	1,066	0,994	0,966	0,855	0,826	0,941	0,089
E	axial	0,124	0,124	0,124	0,125	0,124	0,124	0,001
	radial	0,255	0,232	0,236	0,227	0,229	0,236	0,010
F	axial	0,109	0,096	0,096	0,097	0,095	0,098	0,005
	radial	0,248	0,228	0,230	0,234	0,252	0,238	0,010
G	axial	0,033	0,032	0,034	0,035	0,037	0,034	0,002
	radial	2,487	2,446	2,255	2,142	1,981	2,262	0,188
H	axial	0,053	0,072	0,070	0,074	0,076	0,069	0,009
	radial	2,452	1,656	2,009	1,599	1,510	1,845	0,347
I	axial	0,294	0,293	0,381	0,212	0,204	0,277	0,065
	radial	0,180	0,251	0,286	0,242	0,168	0,225	0,045
J	axial	0,152	0,114	0,112	0,114	0,115	0,122	0,015
	radial	0,247	0,251	0,252	0,246	0,245	0,248	0,003

Quadro A.5. Resultado dos ensaios do Hot Disk para as amostras secas.

Amostra	Cond. Térmica (W/mK)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média	Desvio Padrão
B	axial	0,067	0,067	0,066	0,066	0,065	0,066	0,001
	radial	0,794	0,818	0,845	0,863	0,873	0,839	0,029
C	axial	0,072	0,069	0,068	0,066	0,067	0,068	0,002
	radial	0,441	0,369	0,367	0,360	0,352	0,378	0,032
E	axial	0,092	0,147	0,110	0,092	0,146	0,117	0,025
	radial	0,209	0,241	0,256	0,208	0,332	0,249	0,045
F	axial	0,109	0,118	0,122	0,092	0,084	0,105	0,015
	radial	0,305	0,292	0,347	0,324	0,349	0,323	0,022
G	axial	0,045	0,043	0,042	0,041	0,041	0,042	0,001
	radial	1,396	1,518	1,579	1,598	1,610	1,540	0,079
H	axial	0,090	0,102	0,100	0,099	0,099	0,098	0,004
	radial	0,913	0,827	0,810	0,822	0,832	0,841	0,037
I	axial	0,089	0,093	0,095	0,097	0,095	0,094	0,003
	radial	0,236	0,233	0,226	0,231	0,221	0,229	0,005
J	axial	0,071	0,073	0,073	0,073	0,071	0,072	0,001
	radial	0,244	0,266	0,263	0,272	0,244	0,258	0,012