



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da inflamabilidade de madeiras para construção usadas na envolvente de edifícios

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

João António Correia Gomes

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim Costa

Dr^a. Valeria Reva

Júri

Presidente Professor Doutor Miguel Panão
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Baranda Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Dr^a. Valeria Reva
Investigadora da ADAI-LAETA

Colaboração Institucional



**Associação para o Desenvolvimento
da Aerodinâmica Industrial**

Coimbra, Setembro, 2014

Aos meus pais e irmão.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

À Dr^a Valeria Reva, orientadora da dissertação, pela competência com que orientou o meu trabalho, pelo tempo que me dedicou e pelos conhecimentos transmitidos, totalmente necessários para a elaboração da minha tese.

Ao Professor José Joaquim Costa, orientador da dissertação, pelo apoio, rigor científico e partilha de conhecimentos valiosos para este trabalho.

Ao Sr. António Cardoso, colaborador da ADAI, pela disponibilidade em ajudar na preparação das amostras.

Ao Engenheiro José Neves, da empresa Exotic House, pela prestável colaboração e pelo fornecimento da matéria-prima para as amostras.

Aos meus colegas e amigos de sempre, Carlos, João André, José Gabriel e Pedro, que partilharam comigo este percurso, pelo companheirismo e motivação que sempre me transmitiram.

À Bárbara, quem mais ouviu falar desta tese, pelo apoio incondicional.

Aos meus avós, Francisco, Maria, José e Maria Leonor pelo carinho e amor que me dedicaram ao longo da vida.

Um agradecimento especial aos meus pais, António e Maria João, e ao meu irmão Francisco, por tornarem tudo isto possível, por me apoiarem nos momentos mais difíceis ao longo de todo o meu percurso académico.

Resumo

A presente dissertação de mestrado foca-se no estudo da reação ao fogo de três espécies de madeira (pinho bravo, pinho nórdico e garapa) utilizadas em construção e tem como objetivo determinar os respetivos parâmetros de combustão e inflamabilidade.

De forma a cumprir este objetivo foram realizados procedimentos experimentais com recurso a um calorímetro de bomba de oxigénio e a um calorímetro cónico. Foi avaliada a influência da espessura das amostras e da presença de revestimento químico na reação ao fogo dos materiais em estudo. Através dos ensaios em calorímetro de bomba, foi determinado o poder calorífico superior das diferentes madeiras. Os ensaios realizados com recurso a calorímetro cónico permitiram determinar a evolução da temperatura no interior da amostra e vários parâmetros de combustão, nomeadamente o tempo até à ignição, o tempo até à extinção da chama, a taxa de perda de massa, a taxa de libertação de calor e a energia total libertada. Os procedimentos relativos à evolução da temperatura foram, posteriormente, comparados com a solução analítica encontrada na bibliografia.

Da análise dos resultados obtidos concluiu-se que a garapa é a espécie que apresenta menor risco de inflamabilidade, revelando no entanto características de combustão em chama que a desfavorecem relativamente às espécies de pinho. A espessura e o revestimento químico utilizado revelaram uma influência significativa em alguns dos parâmetros de reação ao fogo estudados.

Palavras-chave: Construção em madeira, risco de incêndio, poder calorífico, perda de massa, taxa de libertação de energia, calorímetro cónico.

Abstract

The present thesis is focused on the study of the reaction to fire of three species of wood (*Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Apuleia leiocarpa*) used in building manufacture. The main goal of the study is to determine the combustion and flammability parameters of each of the wood species considered.

The investigation was based on experimental procedures using an oxygen bomb calorimeter and a cone calorimeter. By modifying the thickness and the chemical treatment of the samples, it was possible to assess the influence of these factors on the fire reaction of the materials. The tests performed in the bomb calorimeter allowed to determine each species' calorific values, while the tests performed in the cone calorimeter provided information about the evolution of temperature throughout the sample and allowed the determination of several combustion parameters such as time to ignition, time to extinction, mass loss rate, heat release rate and total energy released. The experimental procedures related to the evolution of temperature were later compared with the analytical solution for transient heat conduction found in the literature.

From the analysis of the results it was concluded that *Apuleia leiocarpa* is the species that represents the lowest flammability risk, revealing however some flame combustion characteristics that disfavor its use when compared to both of the pine species studied. Furthermore, the thickness and chemical treatment used revealed a meaningful influence in some of the fire reaction parameters studied.

Keywords Wood construction, wood flammability, calorific value, mass loss rate, heat release rate, cone calorimeter.

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	viii
Nomenclatura.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho	1
1.2. Objetivos e organização da tese.....	2
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Construção de casas de madeira no mundo	3
2.2. Apólices de seguro multirriscos de habitação em Portugal	4
2.3. Madeiras utilizadas na construção de edifícios residenciais em Portugal	5
2.4. Metodologias e normas de classificação da reação ao fogo de materiais	6
2.5. Parâmetros de avaliação do comportamento térmico de materiais.....	9
2.5.1. Poder calorífico e taxa de libertação de calor.....	9
2.5.2. Teoria de condução de calor e tempo até ignição.....	10
2.6. Fatores que influenciam o comportamento térmico da madeira.....	12
2.6.1. Densidade	12
2.6.2. Espessura	14
2.6.3. Humidade	14
2.6.4. Revestimento químico	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1. Materiais	18
3.1.1. Descrição e preparação das amostras	19
3.2. Ensaio no calorímetro cónico	21
3.3. Ensaio na bomba calorimétrica	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Evolução da temperatura na amostra	30
4.2. Evolução da temperatura: dados experimentais vs. modelo analítico	34
4.3. Tempo até à ignição	36
4.4. Tempo até extinção da chama.....	37
4.5. Perda de massa.....	38
4.6. Taxa de perda de massa	40
4.7. Poder calorífico superior e inferior.....	43
4.8. Taxa de libertação de calor	44
4.9. Taxa de perda de massa média e energia total libertada.....	46
4.10. Discussão final	47
5. CONCLUSÕES	49
5.1. Avaliação de resultados	49

5.2. Propostas de trabalho futuro	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO A	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Desenho esquemático das amostras com dois termopares na diagonal	20
Figura 3.2 Desenho esquemático das amostras com termopares na horizontal.....	20
Figura 3.3 Esquema representativo do processo de condução nos testes de evolução da temperatura ao longo da superfície	21
Figura 3.4 Sistema experimental – Calorímetro cónico	22
Figura 3.5 Recolha das amostras (a); amostras após corte protegidas por película de alumínio (b); amostra em chama (c).....	23
Figura 3.6 Sistema experimental - Calorímetro de bomba de oxigénio Parr 1341	24
Figura 3.7 Pontos característicos da curva de temperatura	26
Figura 4.1 Evolução da temperatura na superfície das amostras.....	31
Figura 4.2 Evolução da temperatura a 5 mm (a) e 15 mm (b) da superfície das amostras com 20 mm de espessura.....	31
Figura 4.3 Evolução da temperatura a 5mm (a), 15mm (b) e 25mm (c) da superfície aquecida das amostras com 35 mm de espessura	32
Figura 4.4 Evolução da temperatura em amostras com diferentes espessuras: medições a 5 mm (a) e a 15 mm (b) de profundidade.....	33
Figura 4.5 Comparação entre curvas de temperatura do método experimental e do modelo analítico	35
Figura 4.6 Tempo até à ignição da amostra.....	36
Figura 4.7 Tempo até extinção da chama para as amostras com 20 mm de espessura	37
Figura 4.8 Tempo até extinção da chama para as amostras com 35 mm de espessura	38
Figura 4.9 Curvas de perda de massa para as amostras de 20 mm de espessura.....	39
Figura 4.10 Curvas de perda de massa para amostras com espessuras diferentes.....	39
Figura 4.11 Curvas de perda de massa para as amostras com e sem revestimento químico com espessura de 35 mm.....	40
Figura 4.12 Taxa de perda de massa para as amostras de 20 mm de espessura	41
Figura 4.13 Taxa de perda de massa para amostras com espessuras diferentes.....	42
Figura 4.14 Taxa de perda de massa para amostras com e sem revestimento químico.....	42
Figura 4.15 Taxa de libertação de calor para as amostras de 20 mm	45
Figura 4.16 Taxa de libertação de calor para amostras com e sem revestimento químico ..	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Relação entre classes, situações de referência e tipos de ensaio normalizado	7
Tabela 2.2 Correlações propostas para a relação entre humidade, tempo de ignição e propriedades térmicas.....	15
Tabela 3.1 Teor de humidade e densidade de cada espécie.....	19
Tabela 3.2 Parâmetros obtidos na calibração do calorímetro de bomba	27
Tabela 3.3 Energia equivalente do calorímetro de bomba	28
Tabela 4.1 Composição química (Telmo <i>et al.</i> , 2010)	43
Tabela 4.2 Poder calorífico das espécies analisadas.....	43
Tabela 4.3 Perda de massa total, tempo até extinção, taxa de perda de massa média e energia libertada	46

NOMENCLATURA

A – Área [m^2]

a – Tempo até ignição da bomba calorimétrica [s]

b – Tempo correspondente a 60% da variação total da temperatura [s]

c – Tempo de estabilização [s]

C_p – Calor específico [J/(kg.K)]

e_1 – Correção para o calor devido à formação de ácido nítrico [J]

e_2 – Correção para o calor devido à formação de ácido sulfúrico [J]

e_3 – Correção para o calor de combustão do fio de ignição [J]

H – Teor de humidade [%]

H_{bh} – Teor de humidade em base húmida [%]

H_{bs} – Teor de humidade em base seca [%]

h_c – Coeficiente de convecção [$W/(m^2.K)$]

HRR – Heat Release Rate (Taxa de libertação de calor) [kW]

k – Condutividade térmica [$W/(m.K)$]

k_0 – Condutividade térmica da madeira seca [$W/(m.K)$]

L – Espessura da parede [m]

m – Massa [kg]

\dot{m} – Taxa de perda de massa [kg/s]

PCI – Poder calorífico inferior [J/kg]

PCS – Poder calorífico superior [J/kg]

PCS_{bs} – Poder calorífico superior em base seca [J/kg]

PCS_{exp} – Poder calorífico superior calculado experimentalmente [J/kg]

Q – Energia total libertada [kJ]

q – Energia libertada por unidade de massa [kJ/kg]

\dot{Q} – Quantidade de calor transmitido por unidade de tempo [W]

$\dot{q}''(t)$ – Fluxo de calor líquido [$W.m^2$]

-
- \dot{q}_i'' - Fluxo de calor incidente [$\text{W}\cdot\text{m}^2$]
- r_1 - Taxa de aumento da temperatura nos cinco minutos após a ignição [$^\circ\text{C}/\text{min}$]
- r_2 - Taxa de variação da temperatura nos cinco minutos antes do final do ensaio [$^\circ\text{C}/\text{min}$]
- t - Tempo desde o início do ensaio [s]
- T_0 - Temperatura inicial [$^\circ\text{C}$]
- T_a - Temperatura de ignição da bomba calorimétrica [$^\circ\text{C}$]
- T_c - Temperatura de estabilização [$^\circ\text{C}$]
- T_f - Temperatura final [$^\circ\text{C}$]
- T_{ig} - Temperatura de ignição [$^\circ\text{C}$]
- T_s - Temperatura à superfície [$^\circ\text{C}$]
- $T(x,t)$ - Temperatura da amostra numa posição x a t segundos do início do ensaio [$^\circ\text{C}$]
- W - Energia equivalente do calorímetro [$\text{J}/^\circ\text{C}$]
- $w(\text{C})_s$ - Concentração de carbono [%]
- $w(\text{H})_s$ - Concentração de hidrogénio [%]
- $w(\text{N})_s$ - Concentração de azoto [%]
- $w(\text{O})_s$ - Concentração de oxigénio [%]
- x - Distância da zona da amostra analisada à superfície [m]
- α - Coeficiente de absorção [m^{-1}]
- α' - Difusividade térmica [m^2/s]
- Δm - Perda de massa [g]
- ε - Emissividade
- ρ - Densidade [kg/m^3]
- ρ_0 - Densidade em base seca [kg/m^3]
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do trabalho

A madeira é um dos raros materiais de construção de origem natural. A sua utilização como material de construção é bastante vasta no contexto mundial. Nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e em alguns países do norte da Europa, as casas de madeira constituem o principal tipo de construção de residências unifamiliares.

Numa era em que a sustentabilidade do planeta é constantemente posta em causa, nada melhor do ponto de vista ambiental do que a construção usando um material renovável e abundante na natureza, que requer baixos gastos de energia na sua produção, como a madeira. Ainda do ponto de vista ecológico, a madeira tem a vantagem de ser uma forma eficiente de retenção de carbono, baixando assim as emissões de CO₂ para a atmosfera.

Para além dos benefícios ambientais referidos, há qualidades como o baixo custo, a rapidez de construção, a durabilidade, o conforto térmico e a facilidade de trabalho do material, que favorecem o uso de madeira na construção.

Em Portugal a construção de residências em madeira tem vindo a ganhar terreno e há já um número considerável de empresas a atuar nesta área. No entanto, o problema dos incêndios florestais levanta a questão da segurança deste tipo de construções, dado que a madeira é vista como um material de fácil combustibilidade. As próprias entidades seguradoras no ramo de Seguros Multirriscos de Habitação colocam sérias reservas no que diz respeito a este tipo de construção.

Desta forma, o estudo aprofundado da reação ao fogo e em particular da inflamabilidade dos tipos de madeira mais utilizados em construção reveste-se de particular importância.

A decisão relativa às espécies alvo de estudo foi tomada após uma visita à empresa de construção Exotic House, que utiliza como material de construção as espécies *Apuleia leiocarpa* (garapa) e *Pinus sylvestris* (pinho nórdico). Optou-se por estudar três

madeiras provenientes de diferentes zonas do globo: *Apuleia leiocarpa* (garapa) proveniente de zonas exóticas como o Brasil; *Pinus sylvestris* (pinho nórdico), proveniente do norte da Europa e *Pinus pinaster* (pinho bravo), originária do sudoeste da Europa e extremamente abundante em Portugal.

1.2. Objetivos e organização da tese

Este trabalho teve como objetivo estudar a reação ao fogo de três espécies de madeira utilizadas em construção em Portugal, provenientes de distintas zonas do globo. Os resultados deste estudo contribuirão para a posterior avaliação da segurança das construções de madeira relativamente aos incêndios florestais, um aspeto particularmente importante nas zonas de interface urbano-florestal onde o risco de incêndio é muito elevado. Para atingir este objetivo procedeu-se à determinação dos seguintes parâmetros: tempo até ignição, tempo até extinção da chama, taxa de perda de massa, taxa de libertação de calor e energia total libertada. Foram utilizados métodos experimentais para chegar aos valores pretendidos. Entre estes métodos, destacam-se testes de perda de massa e de evolução da temperatura com recurso a termopares em calorímetro cónico e testes de poder calorífico em bomba calorimétrica.

No decorrer dos ensaios experimentais foram considerados diferentes valores de espessura das amostras para analisar a sua influência na variação da massa e da temperatura no interior da amostra. Com o mesmo intuito, foram testadas amostras da mesma espécie com e sem revestimento químico nas mesmas condições laboratoriais.

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema e aos objetivos do trabalho, sendo referido o interesse do assunto estudado para a comunidade científica. No segundo capítulo, “Estado de Arte”, é feito um estudo mais detalhado do tema, tendo em conta o trabalho efetuado por especialistas da área. O terceiro capítulo, denominado “Materiais e Métodos”, é composto pela descrição detalhada dos materiais utilizados e dos procedimentos experimentais executados. No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos, sendo feita a sua interpretação. Por fim, o quinto capítulo é dedicado às conclusões retiradas do estudo.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Construção de casas de madeira no mundo

Uma das grandes preocupações da atualidade é o impacto ambiental da emissão de gases de efeito de estufa. De acordo com as metas estabelecidas pela União Europeia, deverá haver em 2020 uma redução de 20% na emissão de CO₂ comparativamente ao ano de 1990 (Decisão 2009/406/EC). O sector da construção contribui para grande parte do consumo de energia e emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia. Segundo um documento do Instituto de Tecnologia de Karlsruhe, na Alemanha, 42% da energia final consumida e 35% das emissões de gases de efeito de estufa estão relacionadas com a construção de edifícios (Schultman *et al.*, 2010)

A construção de edifícios habitacionais em madeira poderá ser uma boa solução para baixar estes valores, visto ter sido demonstrado por estudos anteriores que o uso de madeira em construção resulta geralmente num menor consumo de energia e em mais baixas emissões de CO₂ do que a utilização de betão (Gustavsson e Sathre, 2006). No entanto, os benefícios da utilização de madeira são ainda visíveis a outros níveis do ciclo de vida dos edifícios, como por exemplo na facilidade de transporte da madeira e na rapidez de construção (Pajchrowski *et al.*, 2014). Tendo em conta as vantagens apresentadas, há países que apostam fortemente neste tipo de construção em edifícios residenciais unifamiliares e multifamiliares. Verificam-se percentagens significativas de utilização de madeira neste tipo de edifícios em países como os Estados Unidos da América, com 90 a 94%, o Canadá, com 76 a 85%, os países nórdicos, com 80 a 85% e a Escócia, com 60% (Morgado *et al.*, 2012). Os próprios governos têm tomado medidas de incentivo à construção em madeira. Em França foi, inclusive, criada nova legislação relativa ao volume mínimo de madeira a utilizar na construção e na Alemanha foram lançadas iniciativas governamentais para aumentar em 20% o consumo de madeira *per capita* (Morgado *et al.*, 2012). Em Portugal, o sector da construção em madeira está em crescimento. Um inquérito realizado pelo LNEC revelou que 72% dos construtores

consideram que a procura de casas de madeira em Portugal aumentou nos últimos anos (LNEC, 2011). Das empresas inquiridas, 40% iniciaram a sua atividade entre 2006 e 2010, o que demonstra a evolução recente no número de empresas especializadas em construção de madeira.

2.2. Apólices de seguro multirriscos de habitação em Portugal

Apesar do crescente número de casas construídas em madeira em Portugal nos últimos anos, há ainda uma grande desconfiança por parte das seguradoras em fornecer apólices de seguro multirriscos de habitação para residências fabricadas neste material.

Para os fins do presente estudo, foram contactadas várias companhias do sector. As companhias de seguros Generali, AXA, Fidelidade - Companhia de Seguros, Zurich Insurance e Açoreana Seguros responderam gentilmente ao pedido de informações. No entanto, das respostas obtidas nenhuma põe em pé de igualdade os seguros multirrisco para as residências unifamiliares de construção tradicional (em betão) e para residências construídas em madeira. Enquanto a Generali referiu, na sua resposta, que não subscreve, por razões de ordem técnica, esse tipo de risco, foi salientado na resposta das restantes empresas contactadas como ponto comum o facto de este tipo de seguro necessitar de aceitação superior. A seguradora AXA referiu, inclusive, que o seguro a casas de madeira “implica uma análise detalhada do objeto seguro e poderá não ser aceite”.

A Fidelidade – Companhia de Seguros, S.A. aceitou fazer uma simulação que permitiu comparar o prémio total a pagar pelo seguro de uma vivenda construída em betão e de uma vivenda construída em madeira. A análise foi feita com base num edifício avaliado em 100.000 € com as mesmas condições em todos os aspetos não relativos ao material de construção. O preço do prémio total a pagar na modalidade de pagamento anual, variou entre 68,11€ para o edifício em betão e 134,08€ para o edifício em madeira. Verificou-se, portanto, um agravamento de aproximadamente 97% no valor do prémio total do edifício de madeira, o que espelha notoriamente a relutância das seguradoras em aceder a este tipo de coberturas. Esta diferença deve-se essencialmente ao maior risco de incêndio associado à construção em madeira. Num documento enviado pela Açoreana

Seguros relativo a uma simulação, é visível a importância da cobertura que compreende risco de incêndio, queda de raio e explosão. Este tipo de risco influencia, segundo o documento em questão, cerca de 25% do prémio comercial anual, sendo assim o tipo de cobertura com maior peso no prémio final. A construção em madeira é considerada pela Açoreana Seguros como um tipo de construção de 3º risco. Assim sendo, para conceder este tipo de seguro é necessário contactar a Delegação institucional, não estando os colaboradores responsáveis pelo atendimento ao público autorizados a fazer este tipo de simulações. Também a Zurich considera a construção em madeira como tipo de construção de 3º risco, não concedendo sequer seguros para edifícios deste tipo. Embora o seguro contra incêndio seja obrigatório por lei para edifícios em propriedade horizontal, ou seja, divididos em frações autónomas, não existe a mesma obrigatoriedade para residências unifamiliares, que é o caso da grande maioria das residências em madeira, o que torna estes seguros ainda menos explorados pelas seguradoras, visto aliarem ao alto risco a baixa procura. A simulação feita pela Açoreana Seguros pode ser consultada no Anexo A da presente dissertação.

2.3. Madeiras utilizadas na construção de edifícios residenciais em Portugal

Existe uma variedade enorme de espécies de madeira adequadas para a construção, havendo uma tentativa generalizada dos construtores de cada país de utilizar madeiras de origem nacional de forma a evitar os custos de importação de grandes quantidades de material. No entanto, segundo um inquérito realizado (LNEC, 2011) apenas cerca de um terço dos construtores de casas de madeira em Portugal utilizam madeiras nativas do país. Segundo o estudo em questão, houve uma grande percentagem de inquiridos que referiu, como principal razão, a falta de qualidade das espécies dominantes em Portugal. No entanto, embora não apresentem características construtivas de grande qualidade em termos de resistência mecânica, há madeiras em Portugal, como o pinheiro bravo ou a criptoméria japónica (abundante nos Açores), que possuem outras características que as tornam interessantes para a construção civil. Entre estas características destacam-se a sua baixa densidade e a aptidão para transformação industrial. Embora a criptoméria seja bastante utilizada nos Açores como material de

construção em estado puro, estas duas espécies são muito apreciadas, essencialmente, no mercado dos aglomerados. O estudo referido anteriormente (LNEC, 2011) revelou ainda que 72% das madeiras utilizadas em paredes exteriores são madeiras resinosas provenientes da Europa, enquanto 16% são madeiras tropicais provenientes de África e da América do Sul. De acordo com a investigação desenvolvida nesta dissertação, a grande maioria das empresas a atuar em Portugal tem, de facto, como madeira de eleição, uma resinosa proveniente da Europa: o Pinho Nórdico. Quanto às madeiras exóticas utilizadas no país, há um leque variado de opções, destacando-se, neste contexto, madeiras como o ipê, o angelim, a câmbala ou a garapa.

2.4. Metodologias e normas de classificação da reação ao fogo de materiais

A norma europeia EN 13501-1 tem como principal objetivo definir um padrão de classificação da reação ao fogo de duas categorias de materiais de construção. Uma destas categorias diz respeito a produtos de construção excluindo os relativos a revestimento de pisos e a outra destina-se a produtos de construção utilizados no revestimento de pisos. Este sistema europeu de classificação de reação ao fogo de materiais veio substituir a especificação E365-1990 do LNEC adotada na regulamentação nacional de segurança contra incêndio, que compreendia as classes M0, M1, M2, M3 e M4 e que se baseava em ensaios nacionais aprovados pelo LNEC. Segundo a especificação E365-1990, a madeira inseria-se na categoria M3 – materiais moderadamente inflamáveis.

As classes EN 13501-1, respeitantes a produtos de construção excluindo os destinados a revestimento de pisos, são A1, A2, B, C, D, E, F. As classes para produtos destinados a revestimento de pisos são A1_{FL}, A2_{FL}, B_{FL}, C_{FL}, D_{FL}, E_{FL}, F_{FL}.

Esta norma baseia-se em cinco tipos de ensaio normalizados: teste de incombustibilidade (EN ISO 1182), teste de calor de combustão (EN ISO 1716), teste de elemento isolado em combustão (EN 13823), teste de inflamabilidade (EN ISO 11925-2) e determinação do comportamento à queima de pavimentos com recurso a uma fonte de calor radiante (EN ISO 9239-1).

A relação entre classes e situações de referência de incêndio respeitantes à categoria de produtos de construção relativos a paredes e tetos estão definidas na tabela 2.1. A madeira maciça sem retardante de fogo insere-se na euroclasse D.

Tabela 2.1 Relação entre classes, situações de referência e tipos de ensaio normalizado

Classe	Relação entre classes e situações de referência de incêndio	Tipo de ensaio normalizado
A1	Produtos que não contribuem para nenhuma fase do incêndio. Por essa razão é assumido que satisfazem todos os requisitos das classes mais baixas.	EN ISO 1182 EN ISO 1716
A2	Satisfazem os critérios da classe C relativos à norma EN 13823. Para além disso, sob condições de fogo completamente desenvolvido, estes produtos não vão contribuir significativamente para a carga combustível nem para a propagação do incêndio.	EN ISO 1182 EN ISO 1716 EN 13823
B	Satisfazem os critérios da classe C, mas de forma mais rigorosa.	EN 13823 EN ISO 11925-2
C	Satisfazem os critérios da classe D, mas de forma mais rigorosa. Para além disso, ao suportar um ataque térmico de um elemento isolado em chama, apresentam uma propagação lateral da chama limitada.	EN 13823 EN ISO 11925-2
D	Produtos que satisfazem os critérios da classe E, mas conseguem resistir por um período de tempo mais longo ao ataque de uma pequena chama sem que ocorra propagação substancial da chama. Para além disso, são capazes de suportar um ataque térmico de um elemento isolado em chama com uma libertação de calor suficientemente limitada.	EN 13823 EN ISO 11925-2
E	Produtos capazes de resistir por um curto período de tempo ao ataque de uma pequena chama sem que ocorra propagação substancial da chama.	EN ISO 11925-2
F	Produtos para os quais a reação ao fogo não é determinada.	Performance indeterminada

A norma EN 13501-1 baseia-se em cinco tipos de ensaio. No entanto, para a classificação de reação ao fogo de materiais que têm como finalidade a construção de paredes ou tetos são utilizados apenas quatro desses tipos de ensaio (Tabela 2.1).

A norma EN ISO 1182, relativa ao teste de incombustibilidade, identifica produtos que não contribuem significativamente para o incêndio.

Para calcular a libertação de calor potencial máxima de um produto em fogo completamente desenvolvido, deverá ser utilizado o teste de calor de combustão relativo à EN ISO 1716. Este teste deverá ser realizado com recurso a uma bomba calorimétrica e permite obter o valor de poder calorífico superior (PCS) e de poder calorífico inferior (PCI).

A norma EN 13823 diz respeito ao teste do elemento isolado em combustão. Este teste tem como objetivo avaliar a contribuição potencial de um produto para o desenvolvimento de um incêndio através da simulação da queima de um elemento isolado no canto de um compartimento próximo do produto em questão. O teste possibilita a determinação do calor total libertado (THR_{600s}), da produção total de fumo (TSP_{600s}) num período de 600 segundos e da propagação lateral da chama (LFS).

Para determinar a inflamabilidade de um produto sob a influência de uma pequena chama piloto é utilizado o teste de inflamabilidade descrito pela norma EN ISO 11925-2. No entanto, o teste no calorímetro cónico é outro método que permite avaliar a inflamabilidade de um material e que fornece uma enorme quantidade de informação. Este método segue o procedimento indicado no padrão internacional ISO 5660-1. Os dados dos resultados deste tipo de ensaio podem ser utilizados para modelar incêndios de maior dimensão e podem servir como previsão de sequências de incêndio realizadas de acordo com a norma EN 13823. Este teste deve ser realizado com um fluxo de calor entre 0 e 100 kW/m^2 e deverão ser testadas três amostras de cada espécie com o mesmo fluxo. Os testes de acordo com a ISO 5660-1 permitem calcular parâmetros como tempo de ignição, taxa de libertação de calor, calor total libertado, taxa de perda de massa, calor de combustão e taxa de produção de fumo.

2.5. Parâmetros de avaliação do comportamento térmico de materiais

2.5.1. Poder calorífico e taxa de libertação de calor

O poder calorífico é definido como sendo a quantidade de calor libertado por unidade de massa numa combustão completa em que os produtos são arrefecidos até à temperatura de entrada dos reagentes (Mendes, 2011). O poder calorífico pode ser referido como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). A diferença entre os dois reside no estado físico da água nos produtos da reação. Enquanto o PCI se refere à energia libertada considerando que a água dos produtos da combustão está no estado gasoso, o PCS considera que a água dos produtos da combustão está no estado líquido. O PCI é calculado com base no valor do PCS e da composição química do material em questão e é bastante útil em termos práticos para calcular a curva da taxa de libertação de calor (*heat release rate*, HRR). A taxa de libertação de calor é uma variável essencial no cálculo de risco de incêndio (Babrauskas e Peacock, 1991) e na definição das características de segurança ao incêndio de materiais (Bryant and Mulholland, 2008). Para delinear a curva de HRR é necessário conhecer não só o valor do PCI, mas também a curva da taxa de perda de massa. O valor de HRR é extremamente importante para a avaliação da reação ao fogo de materiais, pois está correlacionado com a maioria dos outros parâmetros de avaliação, como por exemplo a produção de fumo e gases tóxicos ou a temperatura. Um dos maiores perigos para o ser humano num incêndio é a toxicidade. A potência tóxica é o termo que quantifica quão tóxica é uma substância caso 1 grama da referida substância seja inalado. Contudo, a quantidade de substância inalável é quantificada em caso de incêndio pela taxa de perda de massa, o que significa que quanto maior a taxa de perda de massa, maior a quantidade de gases tóxicos inalados. Para além disso, a taxa de perda de massa quantifica ainda a rapidez do desenvolvimento de um incêndio, ou seja, quanto menor a taxa de perda de massa, mais lenta é a queima do material.

2.5.2. Teoria de condução de calor e tempo até ignição

Existem três mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. É na análise da condução de calor que se focou o teste experimental de evolução da temperatura no interior da amostra realizado no calorímetro cónico. O fenómeno de condução de calor ocorre em sólidos, líquidos e gases. Nas zonas do material com temperatura mais elevada, as partículas possuem um maior nível de energia. Através do contacto com outras moléculas com menor energia e, conseqüentemente, menor temperatura, dá-se um fenómeno de interação molecular com transferência de calor denominado de condução térmica. Segundo Çengel (2006), na obra “Heat transfer: A practical approach”, nos sólidos, este fenómeno dá-se no sentido negativo do gradiente de temperatura (dT/dx), o que significa, que a transferência de calor é feita no sentido das temperaturas mais baixas. A lei que traduz a condução de calor é a Lei de Fourier que se exprime por:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{T_0 - T_f}{L} \quad (2.1)$$

sendo \dot{Q} a quantidade de calor transmitido por unidade de tempo, k a condutividade térmica do material, A a área perpendicular à transmissão de calor, L a espessura da parede e T_0 e T_f as temperaturas das superfícies da parede (distanciadas de L). Através desta fórmula, pode observar-se que a quantidade de calor transmitido por unidade de tempo é inversamente proporcional à espessura do material em questão.

Quando um material como a madeira, inicialmente à temperatura ambiente, é exposto a um determinado fluxo de calor, dá-se, após o processo de aquecimento, uma decomposição do material. Esta decomposição dá-se a uma temperatura denominada de temperatura de pirólise (Haseli *et al*, 2012). A pirólise é a rutura da estrutura molecular de um composto pela ação de altas temperaturas. A teoria clássica da ignição compreende duas fases separadas: a fase de aquecimento e pirólise do sólido, seguida por uma fase de reações químicas na fase gasosa. No entanto, segundo Lamorlette (2014) em condições com uma concentração de oxigénio considerada normal no caso de ignição com chama

piloto, a fase responsável pelas reações químicas é muito mais curta do que a fase de aquecimento e pirólise do sólido. Assim sendo, esta teoria sugere que o momento em que o material entra em ignição equivale ao momento em que atinge a temperatura de pirólise, assumindo que esta temperatura será portanto igual à temperatura de ignição. Esta igualdade é também observada por Atreya *et al.* (1986) e Thomson *et al.* (1988) (*apud* Haseli *et al.*, 2012) O tempo de ignição é então correspondente ao tempo necessário pelo sólido para aquecer até começar a sua pirólise. Em termos práticos é importante saber o tempo de ignição para compreender o comportamento da madeira e perceber quanto tempo demora até entrar em ignição em caso de incêndio. Torero (2008) observou que a ignição pode ser modelada como um problema de condução de calor unidimensional para corpos termicamente espessos. Um corpo termicamente espesso, para a configuração geométrica de placas, é aquele que ao atingir a temperatura de ignição à superfície, mantém a face oposta à temperatura inicial, o que corresponde, na prática, à maioria das situações reais de construção, pois é com este tipo de geometria que as paredes das habitações são geralmente construídas (Reszka *et al.*, 2012). Vários autores referem a solução analítica apresentada por Spearpoint e Quintiere (2000) para o cálculo do tempo até ignição (t_{ig}) de uma partícula termicamente espessa sujeita a um fluxo de calor constante. Esta solução aproximada é baseada num método integral para sólidos semi-infinitos mediante três suposições:

- A ignição dá-se quando a temperatura da superfície atinge um valor crítico T_{ig}
- O sólido é inerte até à ignição
- O sólido é termicamente espesso

O tempo até à ignição da madeira pode então ser calculado, teoricamente, a partir da equação seguinte (Spearpoint e Quintiere, 2000):

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k \cdot \rho \cdot c_p \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{(\dot{q}_i)^2} \quad (2.2)$$

onde:

T_{ig} é a temperatura de ignição;

T_0 é a temperatura inicial;

k é a condutividade térmica;

ρ é a densidade do material;

c_p é o calor específico do material;

\dot{q}_i é o fluxo de calor incidente.

Esta equação é útil como termo de comparação entre a solução analítica e a análise experimental efetuada nesta dissertação. É uma solução aproximada de uma situação de fogo real, pois não tem em conta as variações de fluxo de calor incidente num alvo estacionário por fatores externos, como o vento, típicas de uma situação de incêndio. Babrauskas (2002) realizou uma apresentação sobre a ignição da madeira em que referiu duas gamas de valores para a temperatura de ignição: autoignição (200-510 °C) e ignição pilotada (210-497 °C).

2.6. Fatores que influenciam o comportamento térmico da madeira

2.6.1. Densidade

A densidade ou massa volúmica da madeira varia, não só de espécie para espécie, mas também de árvore para árvore (Quintiere e Spearpoint, 2000). Momoh *et al.* (1996) levaram a cabo uma série de ensaios experimentais que compreenderam a análise de 14 espécies de madeiras exóticas. Estes ensaios revelaram que, para madeiras com maior densidade, o tempo de ignição é em geral maior e a velocidade de propagação da chama menor. Contudo, algumas madeiras, apesar de possuírem densidades similares, apresentaram tempos de ignição e velocidades de propagação de chama bastante distintas, dando o autor como razão para esta discrepância fatores de ordem morfológica, como a composição química, o conteúdo de resina ou a quantidade de espaços vazios entre as

paredes da amostra. Simms e Law (1967) (*apud* McAllister, 2012) sugeriram que as mudanças no tempo de ignição podem ser inteiramente devidas a variações nas propriedades térmicas de um material. De acordo com Janssens (1991), o teor de humidade é um dos fatores que influenciam a densidade. Segundo o autor, considerando ρ_0 a densidade em base seca, k_0 a condutividade térmica da madeira seca, H o teor de humidade, ρ a densidade e k a condutividade térmica, pode obter-se a partir da equação (2.3) e da equação (2.4) a relação entre condutividade térmica e densidade expressa pela equação (2.5).

$$\rho = \frac{1 + 0,01.H}{\rho_0} \quad (2.3)$$

$$k = k_0 + \rho_0 (2 + 0,247.H) \times 10^{-4} \quad (2.4)$$

$$k = k_0 + \frac{(1 + 0,01.H)}{\rho} (2 + 0,247.H) \times 10^{-4} \quad (2.5)$$

A relação anterior revela a interdependência entre densidade e condutividade térmica, reveladora da influência que a densidade pode ter sobre a reação de um material ao fogo.

Para além disso, a influência da densidade no comportamento térmico de um material pode ser ainda observada através da sua proporcionalidade com o tempo de ignição patente na fórmula para o tempo de ignição de partículas termicamente espessas (Spearpoint e Quintiere, 2000), expressa anteriormente no subcapítulo 2.5.2.

Momoh *et al.* (1996) referiram ainda no seu estudo que, teoricamente, madeiras de densidade baixa chegam à ignição mais rápido porque o seu elevado valor de isolamento (baixo valor de k) reduz a dissipação de calor na zona de queima, o que resulta em temperaturas de superfície mais elevadas. Segundo Thomas e Bullen (1979) (*apud* Momoh *et al.*, 1996) este efeito é, habitualmente, referido como inércia térmica e está relacionado com o produto $k.\rho.c$.

2.6.2. Espessura

Um estudo experimental (van Blijderveen *et al*, 2012) chegou à conclusão de que, para fluxos de calor superiores a 120 kW/m^2 , a espessura da amostra dificilmente provoca algum efeito no tempo de ignição. Contudo, para fluxos de calor na ordem dos 20 kW/m^2 , o efeito da espessura no tempo de ignição é considerável. Vários autores referem soluções analíticas diferentes para o tempo de ignição de amostras termicamente espessas e finas. Segundo um estudo de Shi e Chew (2013), o tempo de ignição de materiais combustíveis é afetado pela sua espessura térmica. O referido trabalho considera que um material é considerado como termicamente fino quando o calor proveniente da fonte de calor é absorvido tão rapidamente que não há um gradiente de temperatura significativo através da amostra, ao passo que, no caso de materiais termicamente espessos, há um gradiente térmico considerável entre a face em que incide a radiação e a face oposta. Os materiais utilizados em casos reais de construção, por razões de isolamento térmico e de resistência a incêndios são geralmente materiais termicamente espessos. No entanto, foi demonstrado experimentalmente (Shi e Chew, 2013) que para polímeros, embora a diferença não seja muito significativa, o tempo de ignição diminui para amostras com maior espessura, facto que torna legítimo o estudo da influência da espessura na reação ao fogo de outros materiais, como por exemplo a madeira.

2.6.3. Humidade

Segundo Simms e Law (1967), o teor de água tem três efeitos num sólido: modifica as propriedades térmicas do material, transfere calor por difusão molecular e contribui para o consumo de energia pelo facto de a sua evaporação ser fortemente endotérmica. Foi demonstrado experimentalmente (Momoh *et al.*, 1996) que os tempos de ignição para madeiras com teor de humidade superior são mais elevados. Para além disso, foi observado no mesmo estudo que a taxa de propagação de chama para madeiras húmidas é mais baixa do que para madeiras secas em estufa. Os autores referem que esta diferença se deve ao facto de ser requerido mais tempo e maior quantidade de calor para vaporizar a água contida nas madeiras com teor de humidade mais elevado. Dois estudos (Janssens, 1991) e (Atreya e Abu Zaid, 1991) chegaram, inclusive, à conclusão de que a temperatura de

ignição aumenta 2°C por cada 1% de aumento no teor de humidade (*apud* McAllister, 2012). É, portanto, ponto assente que o teor de humidade influencia, de facto, o comportamento térmico da madeira, no entanto há algum desacordo na comunidade científica quanto à forma como o influencia. Enquanto Babrauskas (2003) defendeu que o efeito da humidade na fase gasosa é mínimo comparativamente ao efeito na fase sólida, Abu-Zaid (1988) afirmou que o aumento da temperatura de ignição com a humidade é mais influente do que as variações causadas por esta nas propriedades térmicas do sólido. A teoria de Babrauskas é corroborada por Simms e Law (1967). Entre outros, estabeleceram, com base na equação (2.3), correlações entre as propriedades intrínsecas do material, o tempo de ignição e o teor de humidade da amostra. Algumas dessas correlações estão apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Correlações propostas para a relação entre humidade, tempo de ignição e propriedades térmicas

Babrauskas (2003)	$t_{ig} = t_{ig,dry} + \frac{a.L.\rho_0.H}{\alpha_s.\dot{q}_i''}$
Moghtaderi (1996)	$t_{ig} = t_{ig,dry} (1 + 0,035.H)^2$
Simms & Law (1967)	$k = k_0 + \rho_0 (2 + 0,247.H) \times 10^{-4}$ $c_p = c_0 + 0,01 \frac{H}{(T_{ig} - T_0)(\Delta W + L + 4,19)}$

Os parâmetros expostos na tabela 2.2 têm o seguinte significado:

- t_{ig} é o tempo até à ignição da amostra;
- $t_{ig,dry}$ é o tempo até à ignição da amostra em base seca;
- a é uma constante definida por Babrauskas (2003) dada por $a = 33,200(\dot{q}_i'')^{-2} - 8,7$;
- L é a espessura da amostra;
- ρ_0 é a densidade em base seca;
- H é o teor de humidade;
- α_s é o coeficiente de absorção da superfície;
- \dot{q}_i'' é o fluxo de calor incidente;

- k é a condutividade térmica da amostra;
- k_0 é a condutividade térmica do material em base seca;
- T_{ig} é a temperatura a que se dá a ignição;
- T_0 é a temperatura inicial;
- c_p é o calor específico;
- C_0 é o calor específico em base seca.

2.6.4. Revestimento químico

Nos dias que correm há, naturalmente, uma grande preocupação por parte dos arquitetos e construtores civis com todos os aspetos referentes à estética dos edifícios. É, portanto, prática recorrente nos edifícios de madeira o uso de produtos de revestimento para proporcionar, não só uma proteção adicional à madeira, mas também para os embelezar. Segundo o inquérito do LNEC, 72% dos construtores de casas de madeira em Portugal utiliza ou prescreve madeiras submetidas a algum tipo de tratamento com produtos preservadores. No entanto, o revestimento químico utilizado tem propriedades termoquímicas diferentes das da madeira, o que pode alterar o seu comportamento na reação ao fogo.

Neste estudo, pretendeu-se avaliar se essa influência é relevante. Para tal, foram testadas, separadamente, amostras de pinho nórdico e de garapa com e sem revestimento químico. As amostras de pinho nórdico testadas foram tratadas com Xylofene, velatura impregnante e verniz tixotrópico, enquanto a garapa foi tratada apenas com velatura impregnante e verniz tixotrópico. As marcas específicas de cada um dos tipos de revestimento não foram fornecidas, no entanto através da pesquisa efetuada foram encontradas algumas propriedades térmicas cuja gama de valores não é muito abrangente. Xylofene é um produto de preservação inseticida, fungicida e anti-térmitas. Segundo o catálogo da empresa Lyctus, no caso do produto Xylofene Profissional M2000, a ausência de solvente orgânico confere-lhe a vantagem de não possuir risco de incêndio. A velatura impregnante é um tipo de produto que penetra na madeira, formando uma flexível película à superfície, o que lhe permite acompanhar as contrações e dilatações naturais da madeira. A empresa nacional Barbot, por exemplo, fornece uma velatura cuja temperatura de

autoignição é de 334 °C e a empresa Dupont comercializa um verniz tixotrópico que tem uma temperatura de auto-ignição de, aproximadamente, 400 °C. Estas temperaturas de autoignição estão compreendidas entre a gama de temperaturas de autoignição típica para madeiras apresentada por Babrauskas (2002) que varia entre os 200 e 510 °C. Isto significa que dependendo do tipo de madeira, o revestimento químico pode afetar de forma extremamente diferente a sua reação ao fogo

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

O pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) é uma espécie resinosa que ocupa 23% (714.000 hectares) da área total da superfície florestal portuguesa, sendo a terceira espécie de maior ocupação florestal no país, apenas superado pelo eucalipto e pelo sobreiro (ICNF, 2013). Apesar das suas propriedades mecânicas não serem particularmente favoráveis à construção, visto ser uma madeira pouco flexível, é bastante utilizada em aglomerados, mobiliário e carpintaria do interior (escadas, portas e roupeiros, por exemplo).

O pinheiro nórdico (*Pinus sylvestris*) é uma espécie resinosa proveniente do norte da Europa, mais especificamente de países como a Finlândia, Suécia e Noruega. A sua madeira é bastante utilizada em construção e, segundo o catálogo fornecido pela empresa de construção Exotic House, apresenta inúmeras características que favorecem a sua utilização. Entre estas características, destacam-se o facto de ser uma madeira fácil de trabalhar quer por meios mecânicos quer com ferramenta manual, a boa capacidade da madeira de receber verniz e polimento (o que permite um bom acabamento superficial) e a facilidade de colagem. A densidade do Pinho Nórdico pode variar consoante a origem geográfica da árvore ou, até mesmo, com a parte da árvore em estudo.

A garapa (*Apuleia leiocarpa*) é uma espécie exótica folhosa, proveniente essencialmente de países da América do Sul, como o Brasil. A sua madeira tem uma densidade bastante elevada. Segundo a Exotic House, é uma madeira aconselhável para construção devido à sua durabilidade e facilidade de moldagem.

Lamorlette (2014) definiu duas gamas de valores para as propriedades termoquímicas da madeira. Segundo o autor, a condutividade térmica, k , da madeira pode variar entre 0,12 e 0,17 W/m.°C e o calor específico, c_p , pode tomar valores entre 1800 e 2850 J/kg.°C. Devido à impossibilidade de efetuar a análise da composição química das amostras, para o efeito do trabalho foram assumidos os valores referidos por Telmo *et al.* (2010). Os valores da composição química das espécies são apresentados na tabela 4.1 do

capítulo 4. Na tabela 3.1 são apresentados os valores de densidade e de humidade das amostras medidos experimentalmente. A densidade foi medida através da razão entre a massa e o volume das amostras, com recurso a uma balança de precisão de 0,01g e a um paquímetro digital. A medição experimental do teor de humidade das amostras foi feita por secagem em estufa e baseou-se nas seguintes equações:

$$H_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{matéria seca}}} \quad (3.1)$$

$$H_{bh} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{matéria seca}} + m_{\text{água}}} \quad (3.2)$$

Tabela 3.1 Teor de humidade e densidade de cada espécie

Espécie	Humidade base seca (%)	Humidade base húmida (%)	Densidade base húmida (kg/m^3)
Pinho Bravo	11,380	10,218	532
Pinho Nórdico	11,413	10,244	478
Garapa	10	9,090	874

3.1.1. Descrição e preparação das amostras

Para os testes de inflamabilidade em calorímetro cónico foram cortadas amostras das três espécies com 60 mm de comprimento e 60 mm de largura. No sentido de determinar a influência da espessura no comportamento ao fogo, foram analisadas amostras com espessura de 20 mm e de 35 mm. Foram efetuados furos nas amostras dispostos de acordo com a figura 3.2 para a inserção de termopares. Houve, inicialmente, uma tentativa de afixar termopares diretamente à superfície da amostra através de ranhuras com diâmetro similar ao dos termopares, no entanto, esse método revelou-se pouco eficaz. A medição das temperaturas superficiais foi então feita através de termopares inseridos em

furos na diagonal (Figura 3.1). Foram feitos três ensaios para cada espécie com e sem medição das temperaturas superficiais das amostras, sendo que, nos casos do pinho nórdico e da garapa, foram testadas amostras com e sem revestimento químico. As superfícies laterais das amostras foram revestidas com papel de alumínio (Figura 3.5 b) para evitar perdas de calor laterais que não acontecem em situações reais de incêndio em edifícios. Para os testes de poder calorífico em bomba calorimétrica, foi triturada madeira das três espécies em estudo sem revestimento químico, com recurso a uma trituradora laboratorial, obtendo-se uma granulometria final de 2 mm.

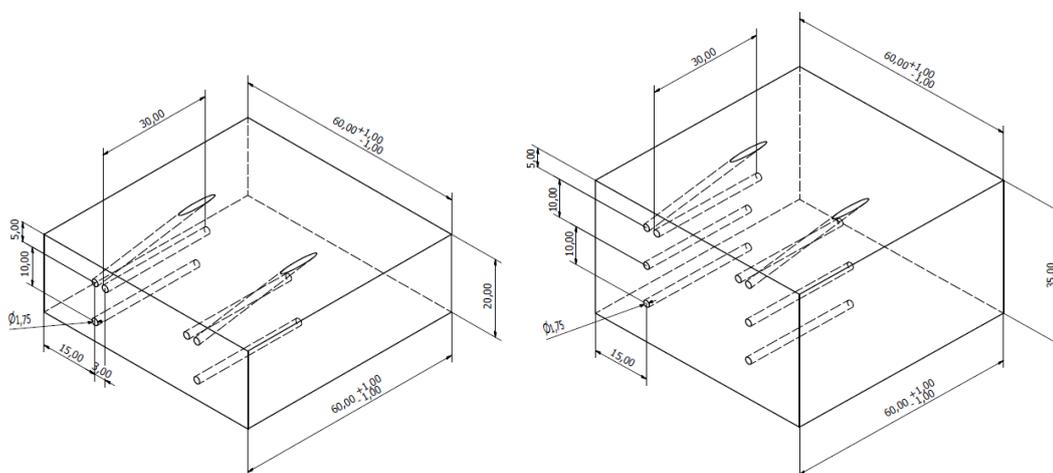


Figura 3.1 Desenho esquemático das amostras com dois termopares na diagonal

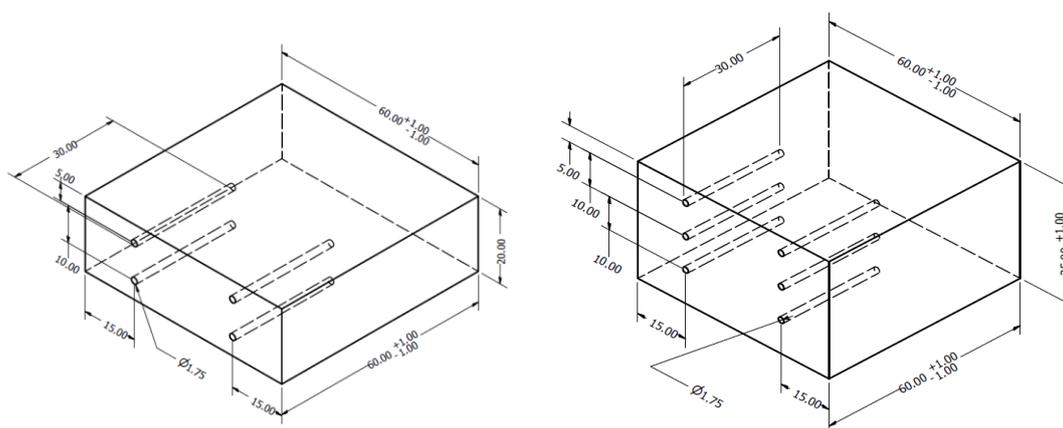


Figura 3.2 Desenho esquemático das amostras com termopares na horizontal

Nos testes de evolução da temperatura no interior da amostra, fez-se incidir numa das superfícies da amostra uma fonte de calor que aqueceu a superfície. Esse calor foi, posteriormente, conduzido através da amostra em direção à superfície oposta. Os

diversos termopares inseridos na amostra, representados como circunferências na figura 3.3, permitiram o registo da temperatura em diferentes profundidades da amostra.

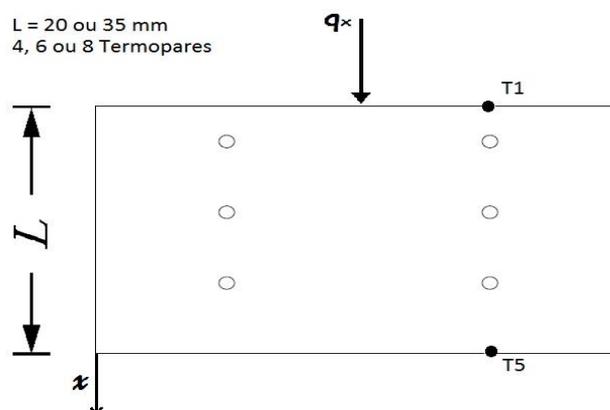


Figura 3.3 Esquema representativo do processo de condução nos testes de evolução da temperatura ao longo da superfície

3.2. Ensaio no calorímetro cónico

O ensaio de inflamabilidade em calorímetro cónico segue o procedimento indicado pelo padrão internacional ISO 5660-1. Este ensaio tem como função determinar parâmetros de reação de materiais ao fogo, como a curva de perda de massa, o tempo até ignição, a taxa de libertação de calor (HRR) e a energia total libertada. No caso experimental em questão, foi ainda determinado o tempo até extinção da chama e a evolução da temperatura ao longo da espessura da amostra com recurso a termopares. O calorímetro fez incidir na amostra um fluxo de calor constante, neste caso de aproximadamente 16 kW/m^2 . Para facilitar a ignição da amostra foi utilizada uma chama-piloto. O suporte da amostra foi colocado sobre uma balança com precisão de $0,01\text{g}$ conectada a um computador que registou os valores de massa da amostra a cada $0,38$ segundos. O tempo de ignição e o tempo de extinção foram medidos manualmente com recurso a um cronómetro, enquanto a temperatura no interior da amostra foi medida com recurso a termopares inseridos em furos a 5 , 15 e 25 mm da superfície ligados a um sistema de aquisição de dados PICOLOG-TC08. O sistema experimental utilizado está representado na figura 3.4. Para cada amostra foram testadas três réplicas, de modo a garantir a validade dos resultados.



Figura 3.4 Sistema experimental – Calorímetro cónico

Previamente à realização dos ensaios, foi feita a calibração do fluxo de calor do calorímetro cónico. A determinação do fluxo de calor foi feita com recurso a um disco de alumínio pintado de preto, de forma a absorver o máximo de radiação possível como acontece teoricamente no caso de corpos negros. A esse disco foi acoplado um termopar ligado a uma placa de aquisição de dados PICOLOG TC-08. Após o tempo necessário para a estabilização do fluxo de calor do calorímetro, o disco foi exposto à fonte de calor durante 30 segundos em que foi registada a sua temperatura. Sendo o calor específico do alumínio conhecido e igual a 875 J/kg.°C, após três repetições do ensaio procedeu-se à resolução analítica do fluxo de calor dada pela expressão 3.3. A média das três medições efetuadas revelou um fluxo de calor igual a 16026 W/m².

$$\dot{q}'' = \frac{m_{disco} \times c_p \times \frac{dT}{dt}}{A_{disco}} \quad [W / m^2] \quad (3.3)$$

O procedimento experimental foi executado de acordo com os seguintes passos:

1. Ligar o calorímetro cónico para a estabilização do fluxo de calor
2. Acoplar balança ao calorímetro e ligá-la a um computador
3. Preparar termopares
4. Ligar PICOLOG TC-08 a um computador
5. Ligar termopares à placa de aquisição de dados PICOLOG TC-08
6. Testar funcionamento dos termopares aquecendo-os ligeiramente
7. Colocar termopares nas ranhuras da amostra
8. Envolver amostras em película de alumínio
9. Proteger zona dos termopares mais exposta ao fluxo de calor com película de alumínio
10. Acender chama piloto
11. Expor amostra ao fluxo de calor, iniciar pesagem, contagem do tempo e registo da temperatura, simultaneamente (requer duas pessoas)
12. Registar tempo até ignição
13. Registar tempo até extinção
14. Aguardar até à estabilização da massa da amostra
15. Concluir procedimento experimental retirando a amostra para posterior arrefecimento

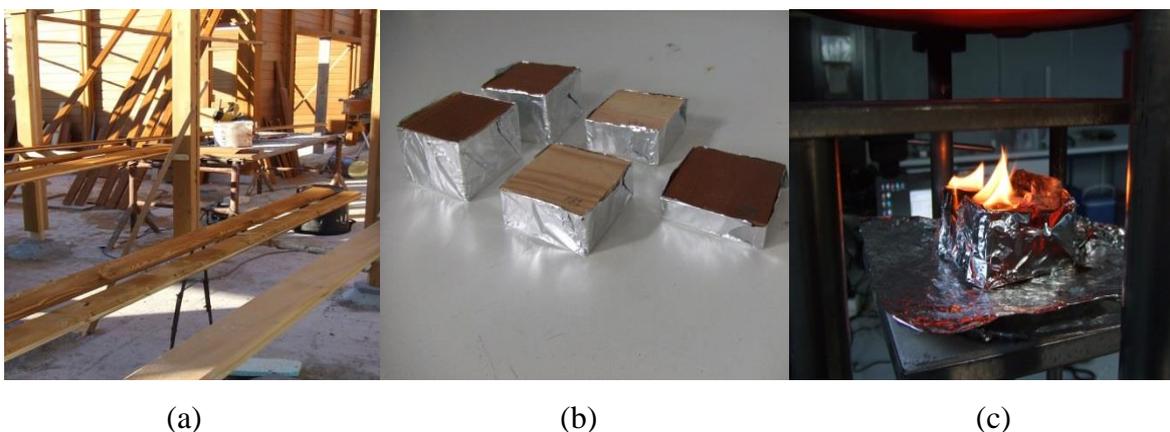


Figura 3.5 Recolha das amostras (a); amostras após corte protegidas por película de alumínio (b); amostra em chama (c)

3.3. Ensaios na bomba calorimétrica

Os ensaios no calorímetro de bomba de oxigénio têm como objetivo determinar o poder calorífico de amostras de sólidos e líquidos inflamáveis. A partir do poder calorífico superior (PCS) determinado, pode ser obtido analiticamente o valor de poder calorífico inferior (PCI). Os ensaios foram realizados recorrendo ao calorímetro de bomba Parr 1341 (Figura 3.6) e basearam-se na Norma Europeia EN 14918 (2009) para determinação do poder calorífico superior.



Figura 3.6 Sistema experimental - Calorímetro de bomba de oxigénio Parr 1341

O calorímetro é constituído por quatro elementos: uma bomba para queima do combustível, um balde com agitador, um revestimento isolante e um sensor de temperatura. Como observado por Mendes (2011), na bomba de oxigénio há eléctrodos que têm como finalidade realizar a ignição de um fio fusível que provocará, conseqüentemente, a combustão da amostra. Esta bomba foi construída para suportar pressões superiores a 20 bar, a que foi sujeita no ensaio experimental realizado neste estudo. A bomba utilizada, da marca Parr, é feita de uma liga de Níquel-Crómio que não é afetada pelos produtos corrosivos resultantes da combustão. O balde tem a capacidade de submergir totalmente a bomba em água e possui um agitador para uniformizar a temperatura. Ao repetir o procedimento experimental a água foi trocada de forma a permitir o seu arrefecimento para posterior utilização. O revestimento isolante tem como função evitar trocas de calor com o exterior durante a combustão, enquanto que o sensor mede as mudanças de temperatura da água do balde.

Os ensaios foram realizados de acordo com o seguinte procedimento:

1. Colocar 2 kg de água destilada no balde
2. Pesar 1 g de amostra numa balança analítica de precisão
3. Colocar o cadinho no respetivo suporte
4. Cortar 10 cm de fio e inseri-lo na ranhura respetiva assegurando que fica em contacto com a amostra, mas não com o cadinho
5. Colocar a tampa na bomba e fechar corretamente
6. Pressurizar a bomba com oxigénio a 20 bar
7. Submergir a bomba na água do balde
8. Ligar os cabos
9. Ligar o agitador
10. Esperar 5 minutos para a temperatura da água estabilizar. Registrar a temperatura
11. Registrar a temperatura em intervalos de um minuto durante cinco minutos
12. Fazer a ignição
13. Registrar valores de temperatura 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 e 180 segundos após a ignição
14. Registrar valores de temperatura em intervalos de um minuto até a temperatura estabilizar
15. Após o ensaio, despressurizar a bomba lentamente
16. Abrir a bomba e verificar se tem resíduos
17. Contabilizar a quantidade de fio não queimado
18. Limpar o cadinho e a bomba

Os ensaios consistiram na combustão de amostras de madeira no interior da bomba com oxigénio a uma pressão de 20 bar. Esta bomba foi colocada num recipiente com 2 kg de água destilada. Em contacto com a água, o sensor mediu os valores de temperatura e transmitiu-os a uma placa de aquisição com mostrador digital que permitiu o registo manual das temperaturas a cada segundo. O poder calorífico da amostra foi de seguida calculado através de pontos característicos da curva de temperatura (Figura 3.7) registada no ensaio e da energia equivalente determinada na calibração.

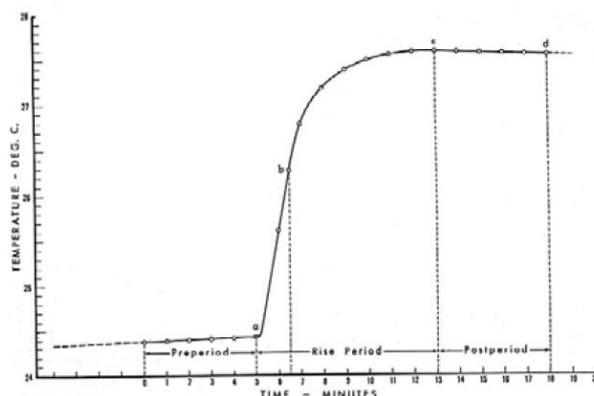


Figura 3.7 Pontos característicos da curva de temperatura

Previamente ao teste de um material com propriedades caloríficas desconhecidas é sempre necessário conhecer a energia equivalente do calorímetro. Tal valor é dado pela soma das capacidades caloríficas do balde, da bomba e da água e pode ser obtido através de um ensaio de acordo com o procedimento experimental acima referido. Este ensaio tem, como material da amostra de teste, ácido benzóico, visto ser, “um material de referência para os testes de combustão porque queima completamente em oxigénio, mas não é higroscópico e está disponível de forma muito pura” (Mendes, R. 2011).

Segundo a norma EN 14918 (2009), a energia equivalente do calorímetro é calculada da seguinte forma:

$$W = \frac{PCS \times m + e_1 + e_3}{T} [\text{cal}/^\circ\text{C}] \quad (3.4)$$

sendo:

m a massa da amostra,

PCS o poder calorífico superior da amostra,

e_1 a correção para o calor devido à formação de ácido nítrico,

e_3 a correção para o calor de combustão do fio de ignição,

T o aumento de temperatura corrigido.

A mesma norma refere que o aumento de temperatura corrigido, T , é dado por:

$$T = T_c - T_a - r_1 \times (b - a) - r_2 \times (c - b) \quad (3.5)$$

Os parâmetros referidos nesta equação têm o seguinte significado:

a é o tempo de ignição;

T_a é a temperatura de ignição;

b é o tempo correspondente a 60% da variação total da temperatura;

c é o tempo de estabilização;

T_c é a temperatura de estabilização;

r_1 é a taxa de aumento da temperatura nos cinco minutos após a ignição;

r_2 é a taxa de variação da temperatura nos cinco minutos antes do final do ensaio.

No caso em estudo, devido à falta de informação relativa ao calor de formação do ácido nítrico, não foi contabilizado, na equação da energia equivalente do calorímetro, o parâmetro e_1 . O valor do poder calorífico do ácido benzóico é conhecido e igual a 6318 cal/g. Através de uma folha de cálculo Excel e tendo em conta os valores obtidos durante o ensaio, foram determinados os parâmetros da tabela seguinte.

Tabela 3.2 Parâmetros obtidos na calibração do calorímetro de bomba

Calibração	a [min]	T_a [°C]	b [min]	c [min]	T_c [°C]	r_1 [°C/min]	r_2 [°C/min]
1	10	21,801	11,4953	18	24,64	0,0026	-0,003
2	10	19,351	11,5102	18	21,683	0,0006	-0,0026

Substituindo os valores da tabela 3.2 na equação 3.5 pôde obter-se o valor de T (Tabela 3.3).

Para obter a energia equivalente do calorímetro de cada ensaio substituíram-se os valores obtidos experimentalmente na equação 3.4. Os resultados estão expostos na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Energia equivalente do calorímetro de bomba

Ensaio	e_3 [cal]	Massa total da amostra [g]	T [°C]	W [cal/ °C]
1	23	1,078	2,85463	2393,94
2	14	1,017	2,34797	2742,55

Para o cálculo do PCS foi utilizado o valor médio da energia equivalente calculada para os dois ensaios ($W_{\text{médio}}$):

$$W_{\text{médio}} = \frac{2393,94 + 2742,55}{2} = 2568,243 [\text{cal}/^\circ\text{C}]$$

Através dos dados obtidos nos testes efetuados na bomba calorimétrica é possível obter pela equação (3.6) (EN 14918, 2009), em que e_2 é a correção para o calor devido à formação de ácido sulfúrico, os valores de poder calorífico superior calculados experimentalmente (PCS_{exp}). Tal como no caso do cálculo da energia equivalente, não foram contabilizadas as correções devidas à formação de ácido nítrico e de ácido sulfúrico.

$$PCS_{\text{exp}} = \frac{T \cdot W - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (3.6)$$

Segundo a norma EN14918, é recomendado o cálculo do PCS a volume constante em base seca (PCS_{bs}) dado por:

$$PCS_{\text{bs}} = PCS_{\text{exp}} \times \frac{100}{100 - H} \quad (3.7)$$

O valor do PCI a pressão constante com um teor de humidade H é o valor de poder calorífico mais utilizado para efeitos práticos (EN 14918) e foi determinado com base na equação (3.8) que tem em conta o PCS_{bs} , o teor de humidade H (%) e as percentagens de hidrogénio, $w(H)_s$, oxigénio, $w(O)_s$, e azoto, $w(N)_s$, presentes na composição química do material.

$$PCI = \left[PCS_{bs} - 212,2w(H)_s - 0,8w(O)_s + w(N)_s \right] \times (1 - 0,01H) - 24,43H \quad (3.8)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Evolução da temperatura na amostra

Durante os ensaios de inflamabilidade em calorímetro cónico, foi feita a medição da temperatura através de termopares inseridos em furos nas amostras a diferentes profundidades. A figura 4.1 mostra os valores médios de temperatura obtidos por termopares inseridos em furos na diagonal até à superfície para cada espécie. Através de marcadores triangulares laranja, estão identificados os pontos correspondentes ao momento de ignição. O pinheiro bravo revelou ser a espécie que mais rapidamente aumentou a sua temperatura à superfície, atingindo, após 100 segundos do início do ensaio, uma temperatura próxima de 450 °C. As temperaturas medidas para as amostras de pinho nórdico e de garapa após o mesmo intervalo de tempo foram de aproximadamente 290 °C e 250 °C, respetivamente. A espécie a entrar mais cedo em ignição foi, como esperado devido à sua baixa densidade (Tabela 3.1), o pinheiro nórdico, com uma temperatura de ignição de 105 °C. O pinho bravo e a garapa apresentaram, entre si, temperaturas de ignição muito próximas, de 175 °C e 169 °C respetivamente. No entanto, sendo a evolução da temperatura à superfície da garapa significativamente mais lenta, esta apenas entra em ignição aproximadamente 70 segundos após o início do ensaio.

Na figura 4.2 apresentam-se as variações de temperatura registadas a 5 e 15 mm da superfície nas amostras com espessura de 20 mm de cada uma das três espécies analisadas. Foi observada uma grande diferença nas temperaturas registadas à medida que os termopares se afastavam da superfície. Após 300 segundos do início do ensaio, a temperatura a 5 mm da superfície alcançou 300-400 °C (conforme a espécie), enquanto a 15 mm da superfície se posicionou entre 70 e 100 °C. Os gráficos da figura 4.2 evidenciam o impacto da densidade na condutividade. Apesar da temperatura do pinho nórdico (madeira com menor densidade) ser relativamente mais baixa do que a temperatura do pinho bravo a 5 mm da superfície, as temperaturas das duas espécies aproximam-se bastante a 15 mm da superfície. A garapa, fruto da sua elevada densidade, apresenta um

comportamento oposto ao do pinho nórdico. As curvas de temperatura da garapa e de pinho nórdico a 5 mm da superfície apresentam apenas uma ligeira diferença. Pelo contrário, mostram evoluções bastante diferentes a 15 mm de profundidade. As amostras em estudo podem ser consideradas termicamente espessas, uma vez que o gradiente térmico existente entre as faces da amostra é enorme. Tal facto é observável, por exemplo, passado 100 segundos do início do ensaio, em que a temperatura da garapa à superfície é de, aproximadamente, 250 °C, enquanto a temperatura a 15 mm da superfície é inferior a 30 °C. Isto significa que haveria um gradiente de temperaturas ainda maior entre as duas faces dispostas a 20 mm uma da outra. O mesmo se verifica, mas em proporções ainda maiores, no caso das madeiras de pinho.

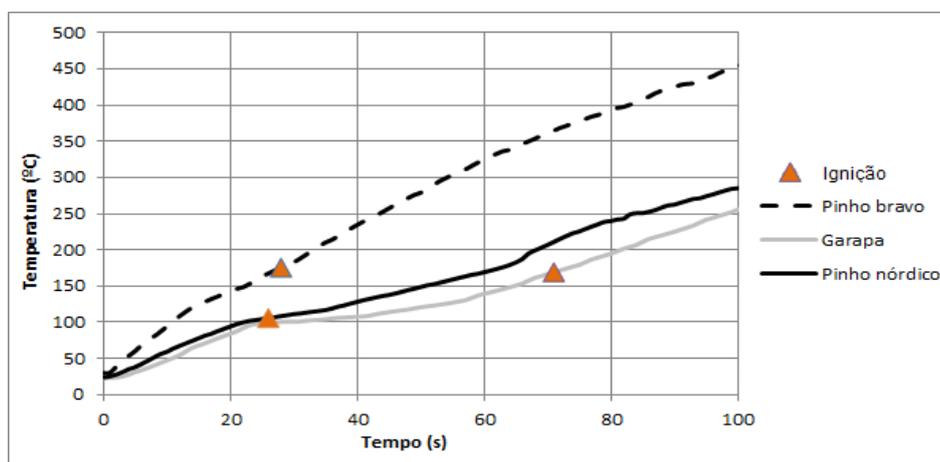


Figura 4.1 Evolução da temperatura na superfície das amostras

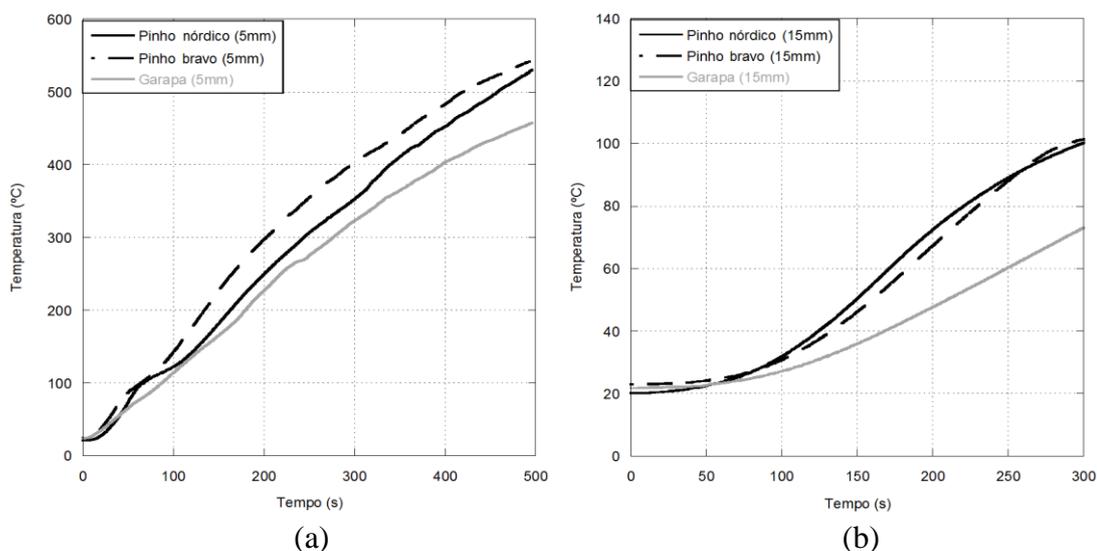


Figura 4.2 Evolução da temperatura a 5 mm (a) e 15 mm (b) da superfície das amostras com 20 mm de espessura

Na figura 4.3 está representada a evolução da temperatura registada nos primeiros 300 segundos dos ensaios de inflamabilidade das amostras com 35 mm de espessura, a 5, 15 e 25 mm da superfície aquecida, respetivamente. Depois de observada a evolução mais lenta da temperatura nas amostras de garapa, comparativamente às amostras de pinho, o objetivo dos ensaios com amostras de 35 mm foi o de aferir a influência da espessura na evolução da temperatura dentro de amostras da mesma espécie e comparar as diferenças na variação da temperatura de madeiras com e sem revestimento químico.

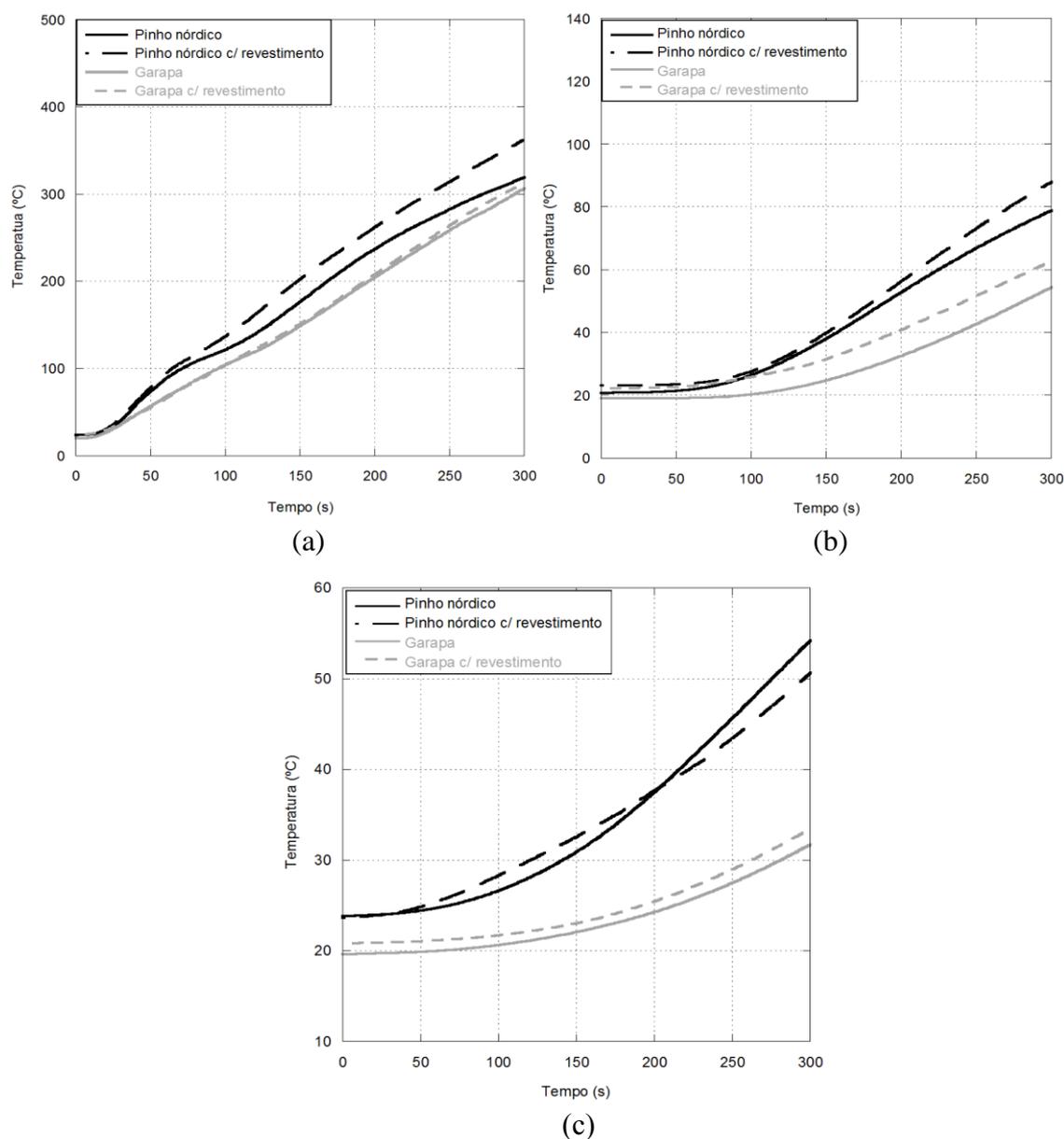


Figura 4.3 Evolução da temperatura a 5mm (a), 15mm (b) e 25mm (c) da superfície aquecida das amostras com 35 mm de espessura

Nas figuras 4.3 (a) e (b) observa-se um declive mais acentuado na curva de temperatura das amostras com revestimento químico, tanto no caso da garapa como no caso do pinho nórdico. Assim sendo, a temperatura aumenta mais rapidamente na superfície dos materiais com revestimento, facto que ajuda a explicar o menor tempo de ignição (subcapítulo 4.3) para as amostras com revestimento. A 25 mm da superfície (Figura 4.3c) a variação considerável nos declives das amostras com e sem revestimento já não se verifica. A temperatura no interior da amostra atinge aproximadamente 50°C para o pinho nórdico (madeira de baixa densidade) e 30°C para a garapa (madeira muito densa).

A figura 4.4 apresenta a evolução da temperatura em amostras da mesma espécie com diferente espessura. Da análise dos gráficos pôde chegar-se à conclusão de que as amostras com menor espessura revelaram um aumento de temperatura mais rápido. Assim sendo, espessuras maiores têm não só maior quantidade de material para queimar até chegar ao interior da parede, mas também uma taxa de evolução de temperatura mais baixa. Isto significa que um ligeiro aumento da espessura da parede pode fazer uma grande diferença na temperatura das paredes interiores em caso de incêndio.

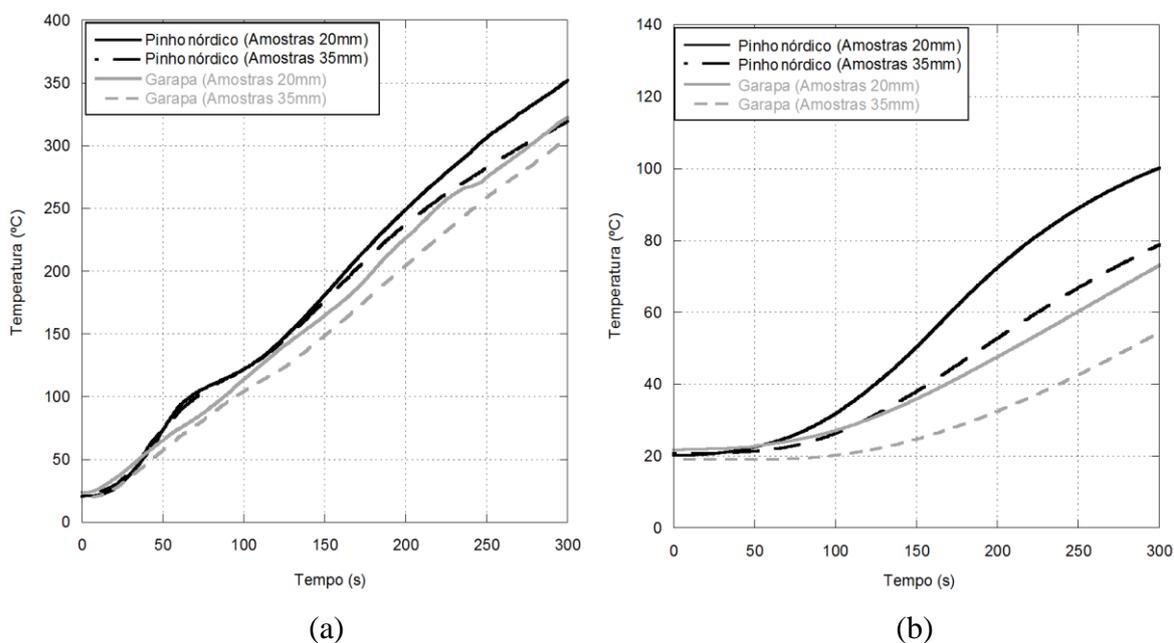


Figura 4.4 Evolução da temperatura em amostras com diferentes espessuras: medições a 5 mm (a) e a 15 mm (b) de profundidade

4.2. Evolução da temperatura: dados experimentais vs. modelo analítico

São vários os livros que apresentam as soluções analíticas para a equação geral diferencial da condução de calor, em regime transiente e unidimensional, para sólidos semi-infinitos sujeitos a condições superficiais de temperatura ou de fluxo conhecidos e constantes.

Neste subcapítulo pretendeu-se comparar os dados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através da solução analítica, que tem em conta a distância da zona que se pretende analisar até à superfície exposta a um fluxo de calor constante.

O modelo analítico (apresentado, por exemplo, em Çengel (2006)) para placas semi-infinitas em regime unidimensional com fluxo de calor incidente constante traduz-se na seguinte equação:

$$T(x,t) - T_0 = \frac{\dot{q}_i}{k} \left[\sqrt{\frac{4\alpha't}{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha't}\right) - x \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha't}}\right) \right] \quad (4.1)$$

Os parâmetros identificados na equação 4.1 têm o seguinte significado:

- $T(x,t)$ é a temperatura da amostra numa posição x a t segundos do início do ensaio
- T_0 é a temperatura inicial da amostra, supostamente uniforme
- \dot{q}_i é o fluxo de calor incidente, suposto conhecido e constante
- k é a condutividade térmica
- α' é a difusividade térmica
- t é o tempo desde o início do ensaio
- x é a distância da zona da amostra analisada à superfície

Na figura 4.5 são apresentadas as curvas de temperatura medidas experimentalmente e as curvas teóricas baseadas na solução analítica. No caso da garapa as duas curvas de temperatura têm um declive bastante aproximado. No entanto, através da análise da curva de temperatura do pinho nórdico, denota-se, essencialmente na análise a 5 mm da superfície, uma diferença acentuada entre os dois métodos. Essa diferença pode,

eventualmente, estar relacionada com a incerteza nas variáveis de condutividade térmica, k , e calor específico, c_p , valores que não foram determinados experimentalmente neste estudo para o caso específico das amostras analisadas, mas sim baseados em valores encontrados na literatura científica (MacLean, 1941) e (Incropera *et al.*, 2007). O erro associado a este tipo de soluções analíticas pode estar também relacionado com pequenos fatores externos, como correntes de ar ou variações na temperatura ambiente, entre outros, que são muito difíceis de contabilizar e podem influenciar o fluxo de calor efetivo. Contudo, este modelo aparenta permitir uma razoável aproximação dos dados nos 200 segundos iniciais.

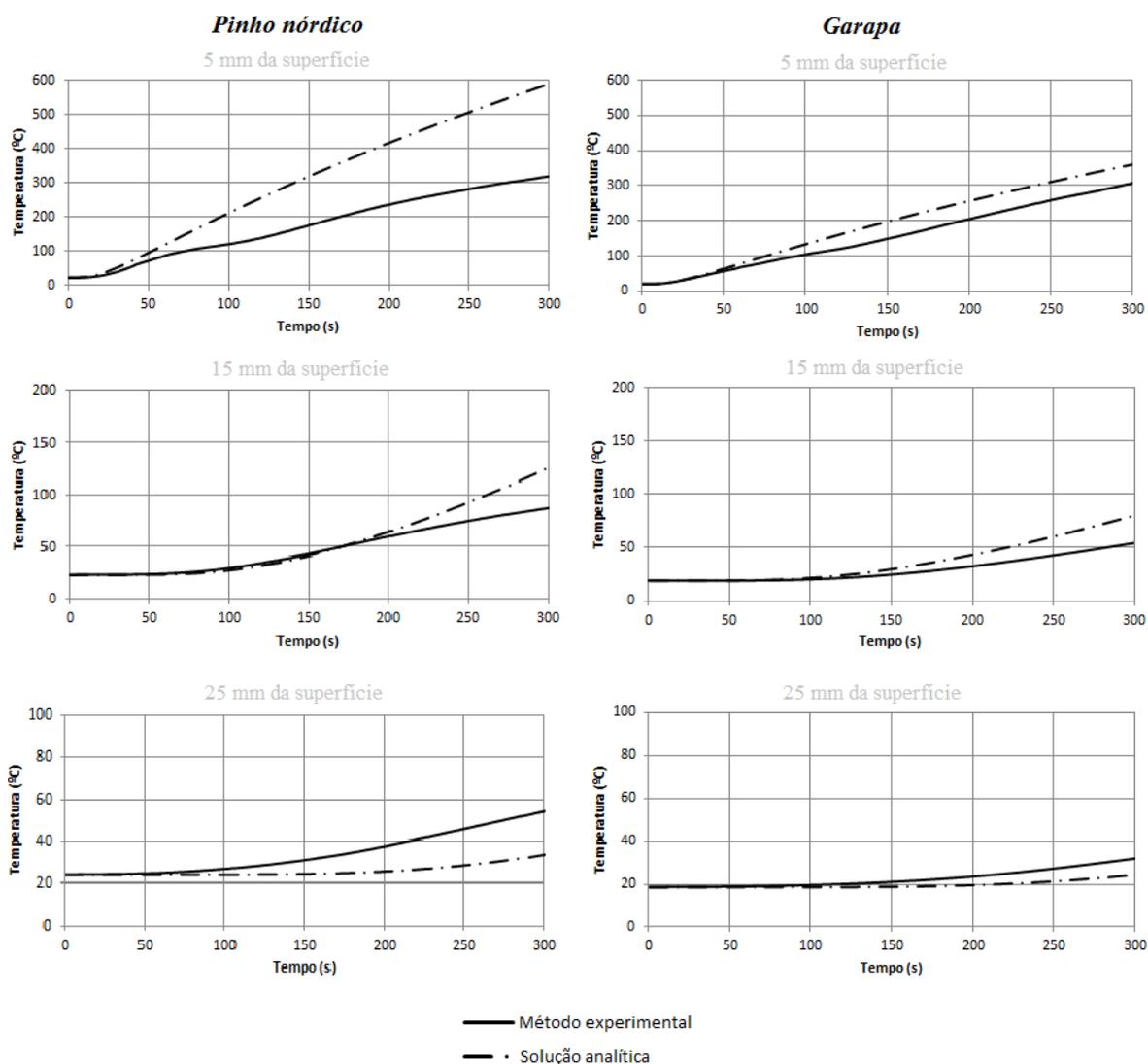


Figura 4.5 Comparação entre curvas de temperatura do método experimental e do modelo analítico

4.3. Tempo até à ignição

Na figura 4.6 encontram-se os tempos de ignição médios obtidos para as amostras analisadas. Como esperado, as espécies com densidade mais baixa apresentaram tempos de ignição mais curtos. Analisando as amostras com 20 mm de espessura, pode observar-se que o pinho nórdico apresentou um tempo de ignição mais curto (26 s), comparativamente ao pinho bravo (28,4 s) e à garapa (71,6 s). O maior tempo até à ignição da garapa é um bom indicador relativamente à resistência desta madeira à ignição e pode ser uma vantagem no caso de incêndio de um edifício. Com o aumento da espessura, verificou-se um ligeiro decréscimo (~9%) nos tempos de ignição do pinho nórdico (de 26 para 24,3 s) e da garapa (de 71,6 para 65 s). Quanto à influência do revestimento químico aplicado, embora o revestimento aplicado no pinho nórdico seja ligeiramente diferente do aplicado na garapa, houve um acentuado decréscimo (~25 a 27%) no tempo de ignição de ambas as espécies quando sujeitas a tratamento químico. O tempo de ignição do pinho nórdico decresceu de 24,3 segundos nas amostras sem revestimento para 18,4 segundos nas amostras com revestimento, enquanto o tempo de ignição da garapa sofreu um decréscimo de 65 segundos nas amostras sem revestimento para 47,6 segundos nas amostras com revestimento.

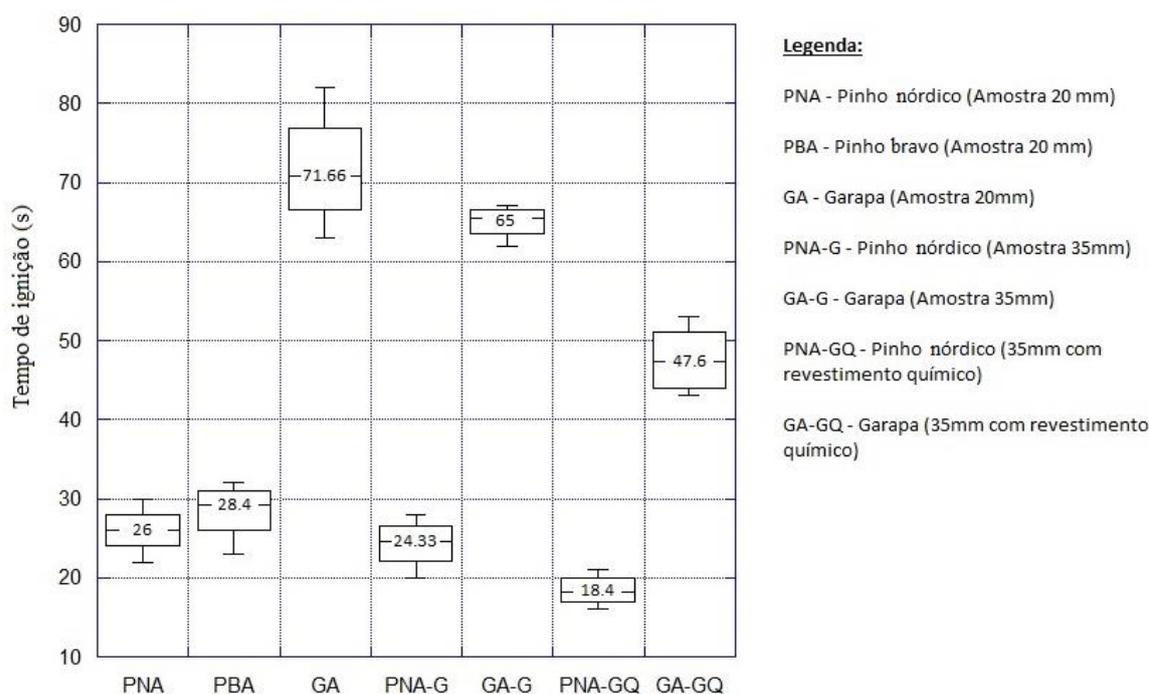


Figura 4.6 Tempo até à ignição da amostra

4.4. Tempo até extinção da chama

Na figura 4.7 apresentam-se os tempos médios até à extinção da chama para as três espécies estudadas. O pinheiro nórdico é a espécie em que a chama se extingue mais rápido (1164 s), seguida do pinheiro bravo (1203 s), sendo o tempo médio até à extinção da chama bastante mais longo no caso da garapa (1428 s). O tempo até à extinção da chama foi contabilizado a partir do início do ensaio e pode ser um indicador importante na análise da reação ao fogo de materiais embora seja uma variável que fornece informação relativamente ambígua. O facto de um material arder em chama durante mais tempo pode significar que a sua perda de massa é feita mais lentamente (comparativamente à sua densidade) e se degradará, conseqüentemente, a um ritmo mais lento, no entanto, pode também significar que em caso de incêndio o fogo demorará mais tempo a extinguir-se. Desta forma, um baixo tempo até extinção da chama pode ser favorável, especialmente, no caso de deteção tardia do incêndio. Na figura 4.8 apresentam-se os tempos médios até extinção da chama para as amostras de 35 mm de espessura de pinho nórdico e de garapa com e sem revestimento químico. Tanto no caso do pinho nórdico como da garapa, as amostras com revestimento químico revelaram um tempo até extinção da chama bastante inferior ao das amostras sem revestimento. O pinho com revestimento extinguiu-se 196 segundos mais cedo do que o pinho sem revestimento, enquanto que a garapa se extinguiu 313 segundos mais rápido com revestimento do que sem revestimento.

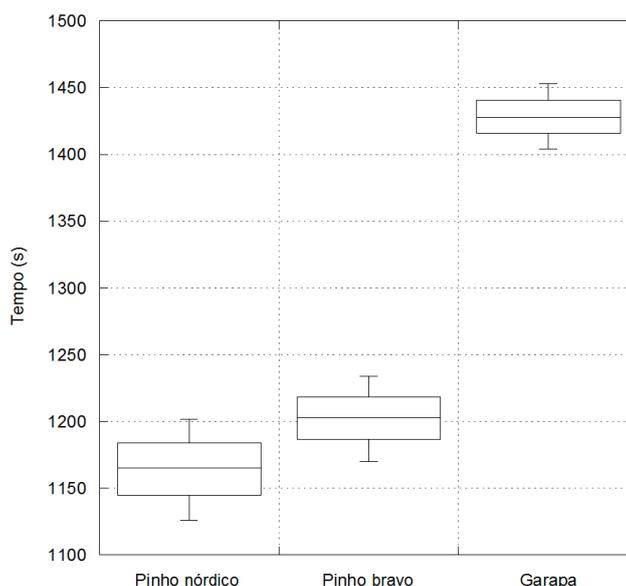


Figura 4.7 Tempo até extinção da chama para as amostras com 20 mm de espessura

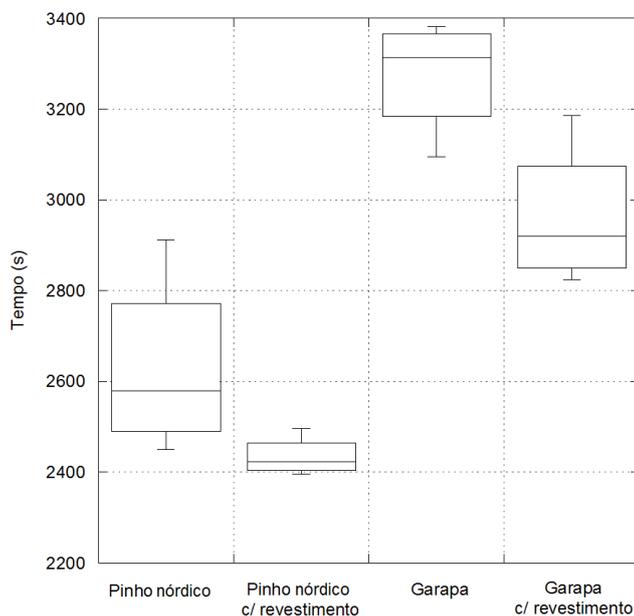


Figura 4.8 Tempo até extinção da chama para as amostras com 35 mm de espessura

4.5. Perda de massa

A perda de massa das amostras foi registada pela balança de precisão conectada ao computador. Os valores de massa obtidos foram adimensionalizados para ser possível comparar os dados das diferentes espécies, visto que apesar de as amostras possuírem o mesmo volume, possuíam densidades e, conseqüentemente, massas diferentes. Esta adimensionalização foi feita através do quociente entre os valores de massa registados e a massa inicial da amostra. Na figura 4.9 estão representadas as curvas de perda de massa para as amostras com espessura de 20 mm. A garapa foi a espécie que revelou ter uma curva de perda de massa, proporcionalmente à sua densidade, mais lenta. Este facto pode estar relacionado com o tempo de ignição mais elevado da garapa, visto que, como se pode verificar pelo gráfico, a fase de secagem e aquecimento até à ignição é mais longa, começando a acentuar-se o declive da curva relativamente mais tarde do que nas outras espécies. Embora haja apenas uma ligeira diferença entre as duas espécies, pode verificar-se também que o pinho nórdico perde massa mais rapidamente do que o pinho bravo. Na figura 4.10 são comparadas as curvas de perda de massa adimensionalizada de amostras da mesma espécie, mas com espessuras diferentes. Como expectável, as curvas de perda de massa das amostras com maior espessura têm menor declive, pois não só revelaram

menores taxas de perda de massa, como têm um valor de massa muito superior. As curvas de perda de massa de amostras da mesma espécie com e sem revestimento estão ilustradas na figura 4.11 e revelaram-se praticamente idênticas, o que demonstra que a influência do revestimento químico utilizado é, nesta curva, praticamente nula.

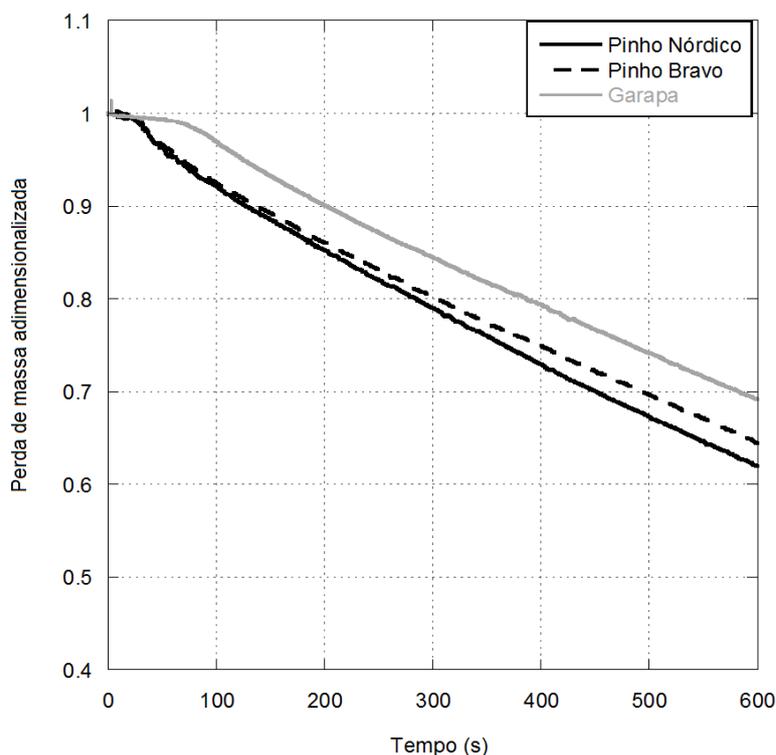


Figura 4.9 Curvas de perda de massa para as amostras de 20 mm de espessura

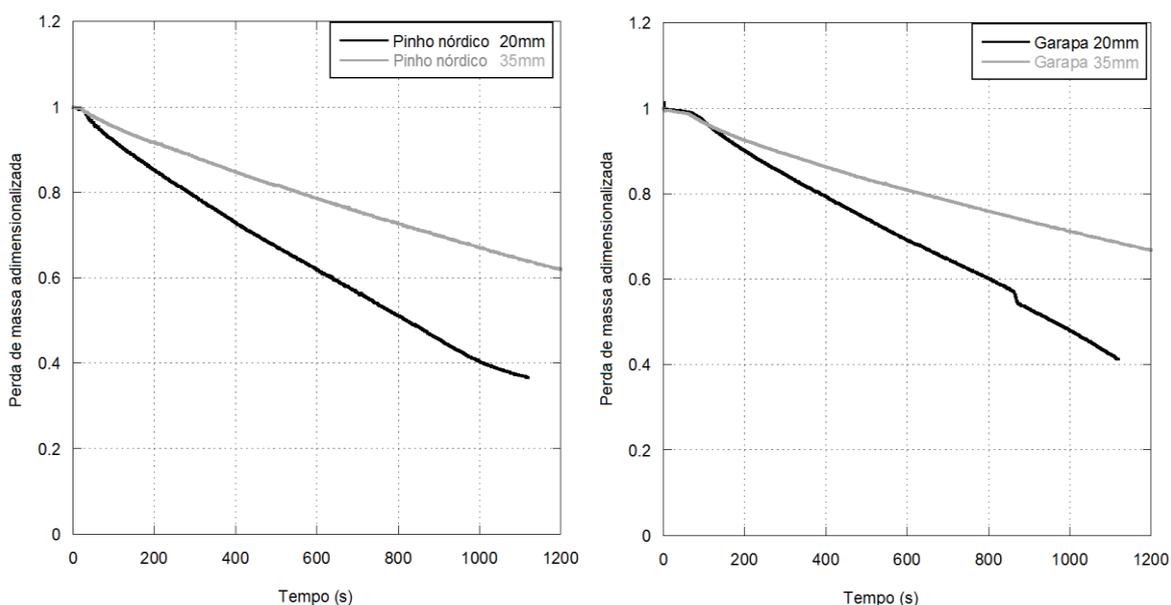


Figura 4.10 Curvas de perda de massa para amostras com espessuras diferentes

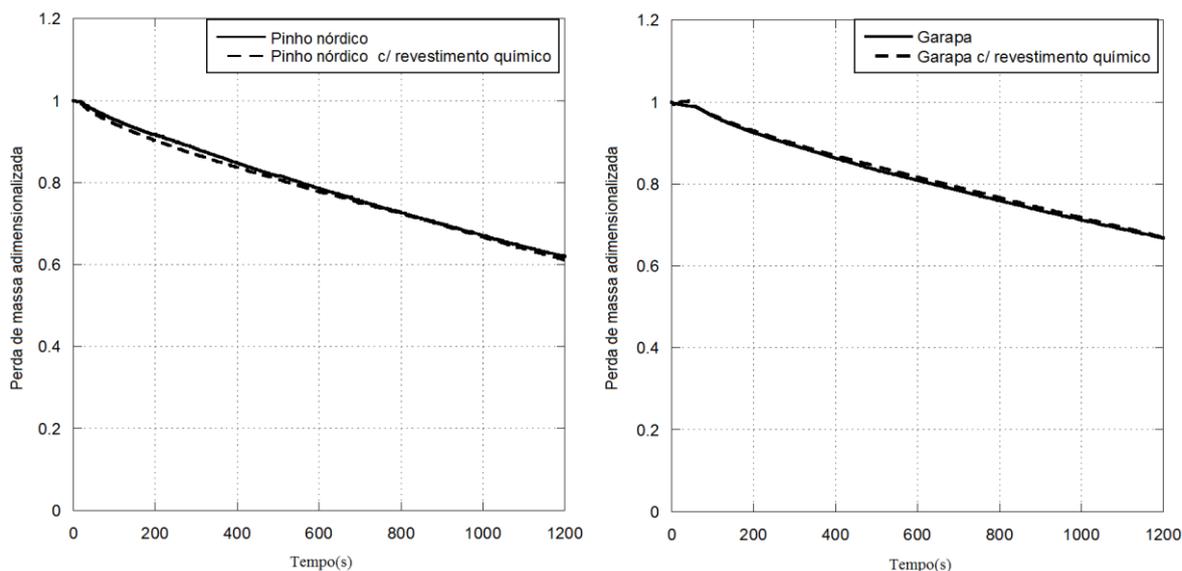


Figura 4.11 Curvas de perda de massa para as amostras com e sem revestimento químico com espessura de 35 mm

4.6. Taxa de perda de massa

A taxa de perda de massa, definida pela equação $\dot{m} = -dm/dt$, permite conhecer a velocidade a que um material perde massa e é essencial para a determinação da taxa de libertação de calor (HRR). Na figura 4.12 estão representadas as taxas de perda de massa das amostras das três espécies com 20 mm de espessura. É possível observar-se pela análise do gráfico que, embora o máximo da taxa de perda de massa na garapa seja bastante superior ao das duas espécies de pinho, o aumento da curva dá-se relativamente mais tarde. O máximo da taxa de perda de massa da garapa é de 0,0475 g/s, enquanto que o do pinho bravo é de 0,043 g/s e o do pinho nórdico é de 0,039 g/s. No entanto, o aumento acentuado da taxa de perda de massa dá-se nos instantes iniciais do ensaio para as amostras de pinho bravo e pinho nórdico, mas apenas cerca de 40 segundos depois do início do ensaio no caso da garapa. Este facto está relacionado com o maior tempo de ignição da garapa e leva a que o ponto máximo da taxa de perda de massa da garapa aconteça por volta dos 160 segundos após o início do ensaio, ou seja, mais tarde do que o máximo das curvas de pinho bravo e pinho nórdico (aproximadamente aos 40 segundos). Na figura 4.13 apresentam-se as curvas de taxa de perda de massa para amostras da mesma espécie com espessuras diferentes. Não há uma diferença considerável no máximo das curvas para as

amostras de 20 e 35 mm de espessura. A diferença que se observa pela análise do gráfico prende-se com o momento em que se dá esse máximo. Nas amostras com maior espessura, o máximo dá-se ligeiramente antes do que nas amostras com menor espessura, o que corrobora a teoria de que o tempo de ignição está relacionado com a curva de taxa de perda de massa, sendo tão mais tardio o pico máximo da curva quanto maior o tempo até ignição. A figura 4.14 demonstra um resultado interessante relativamente à taxa de perda de massa das amostras com e sem revestimento químico. Enquanto no caso da garapa, apesar de valores mais elevados nas amostras com revestimento químico, os valores máximos da curva são relativamente parecidos, no caso do pinho nórdico há uma discrepância extremamente acentuada entre o valor máximo da taxa de perda de massa nas amostras com e sem revestimento químico. Enquanto as amostras sem revestimento revelaram um pico de 0,039 g/s, nas amostras com revestimento foi medido um pico na ordem dos 0,049 g/s. Ambas as espécies revelaram menor tempo até ao pico quando revestidas quimicamente. A diferença verificada na análise dos dois gráficos pode, eventualmente, estar relacionada com a diferença de revestimento químico. O uso de Xylofene no revestimento dado ao pinho nórdico pode acentuar o aumento do valor máximo da taxa de perda de massa, visto ser esse o único fator de diferenciação nos ensaios efetuados para as duas espécies.

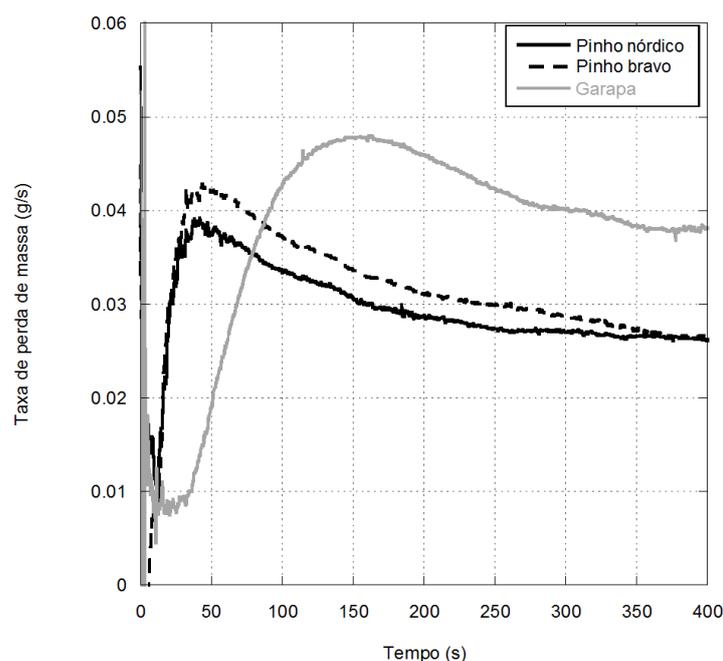


Figura 4.12 Taxa de perda de massa para as amostras de 20 mm de espessura

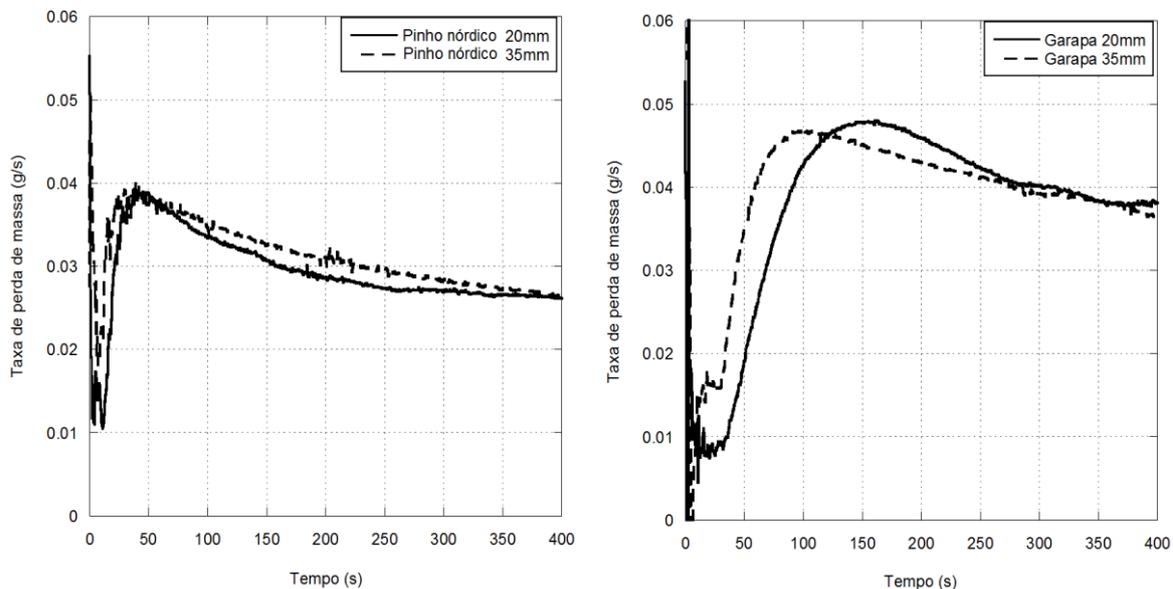


Figura 4.13 Taxa de perda de massa para amostras com espessuras diferentes

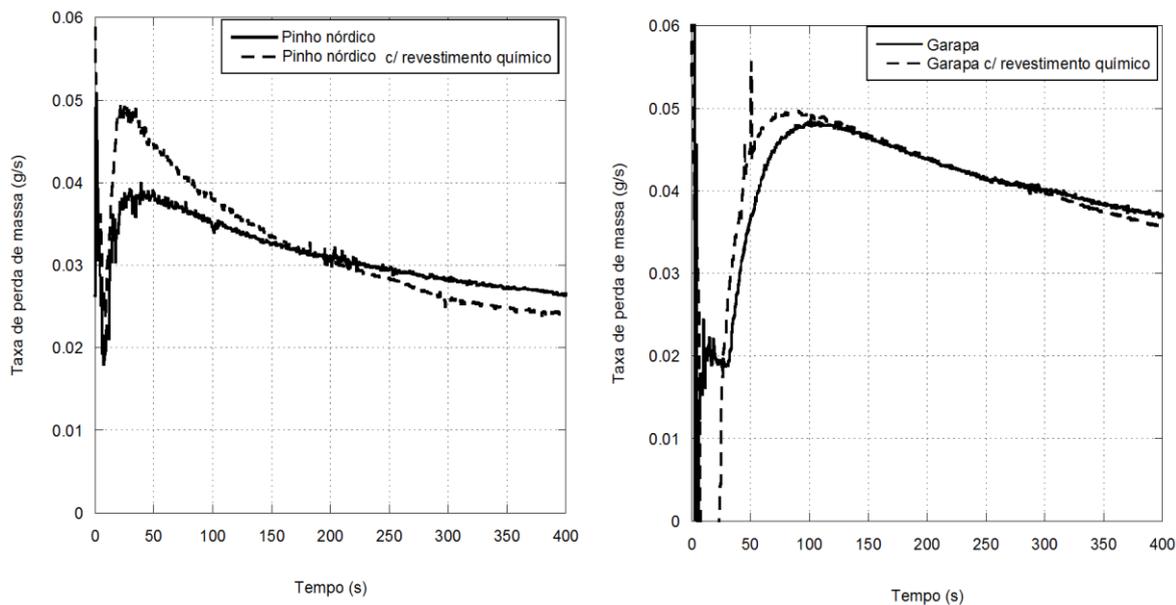


Figura 4.14 Taxa de perda de massa para amostras com e sem revestimento químico

4.7. Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico das amostras foi calculado com base nas equações (3.6), (3.7) e (3.8) referidas na norma EN14918 (2009). Para calcular o PCI, foi necessário conhecer a composição química e o teor de humidade de cada material. Para os efeitos do estudo, foram utilizados os valores apresentados na tabela 4.1 referidos por Telmo *et al.* (2010). Enquanto a composição química do pinho bravo foi calculada experimentalmente por Telmo *et al.* (2010), para os casos do pinho nórdico e da garapa foram assumidos os valores médios de composição química de *softwoods* (resinosas) e de *hardwoods* (folhosas), referidos em CEN/TS 14961, 2005 (Telmo *et al.*, 2010).

Tabela 4.1 Composição química (Telmo *et al.*, 2010)

Espécie	% C	% H	% O	% N
Pinho Nórdico	51	6,3	42	0,1
<i>Softwoods</i> (Pinho Bravo)	48,4	6	45,3	0,1
<i>Hardwoods</i> (Garapa)	49	6,2	44	0,1

Na tabela 4.2 são apresentados os valores de teor de humidade (H_{bh}), poder calorífico superior determinado com recurso à bomba calorimétrica (PCS_{exp}), poder calorífico superior em base seca (PCS_{bs}) (Equação 3.7) e poder calorífico inferior (PCI) (Equação 3.8).

Tabela 4.2 Poder calorífico das espécies analisadas

Espécie	H_{bh} (%)	PCS_{exp} (MJ/kg)	PCS_{bs} (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Pinho nórdico	10,244	19,054	21,228	17,573
Pinho bravo	10,217	19,512	21,732	18,086
Garapa	9,090	19,166	21,082	17,715

Uma análise aos poderes caloríficos obtidos revela que o pinheiro bravo é, das três, a espécie com PCS_{exp} , PCS_{bs} e PCI mais elevados. O PCI de 18,086 MJ/kg do pinho bravo provocará um maior aumento na curva da taxa de libertação de energia (HRR) e na energia total libertada do que o PCI de 17,715 MJ/kg da garapa e de 17,573 MJ/kg do pinho nórdico, visto que os dois parâmetros mencionados são proporcionais ao PCI.

4.8. Taxa de libertação de calor

As curvas de taxa de libertação de calor foram obtidas através do produto da taxa de perda de massa pelo valor do PCI patente na equação 4.2 (Bryant and Mulholland, 2008).

$$HRR = \dot{m} \times PCI \quad (4.2)$$

Os parâmetros presentes na equação 4.2 têm o seguinte significado:

- HRR é a taxa de libertação de calor
- \dot{m} é a taxa de perda de massa
- PCI é o poder calorífico inferior

A taxa de libertação de calor é o calor libertado por unidade de tempo e o respetivo gráfico tem, naturalmente, um aspeto similar às curvas de taxa de perda de massa. Na figura 4.15 estão representadas as curvas da taxa de libertação de calor para a garapa, o pinho nórdico e o pinho bravo. Fruto do maior PCI do pinho bravo relativamente às duas outras espécies analisadas, existe neste gráfico uma diferença maior entre a curva do pinho nórdico e do pinho bravo, do que na curva de taxa de perda de massa. Por outro lado, a diferença entre as curvas de HRR do pinho bravo e da garapa foi encurtada relativamente à das curvas de taxa de perda de massa. O pico de HRR da garapa é, no entanto, ainda significativamente superior aos picos de HRR das duas espécies de pinho. Enquanto o pico de HRR das amostras de garapa se situa nos 850 W, o pico do pinho bravo situa-se nos 778 W e o pinho nórdico atinge no seu pico de HRR aproximadamente 685 W. Não foram comparados os gráficos de amostras da mesma espécie com diferente espessura pois as conclusões a retirar seriam as mesmas dos gráficos da taxa de perda de massa. A figura 4.16 representa a diferença entre as curvas da taxa de libertação de calor

de amostras com e sem revestimento. O pico da taxa de libertação de calor no caso de amostras de pinho nórdico com revestimento químico ultrapassa os 860 W, mais 175 W que as amostras da mesma espécie sem revestimento, enquanto que a garapa atinge, com revestimento, 885 W de pico de HRR, apenas cerca de 40 W a mais do que as amostras sem revestimento. Tal facto pode ser representativo da influência do tipo de revestimento na taxa de libertação de calor.

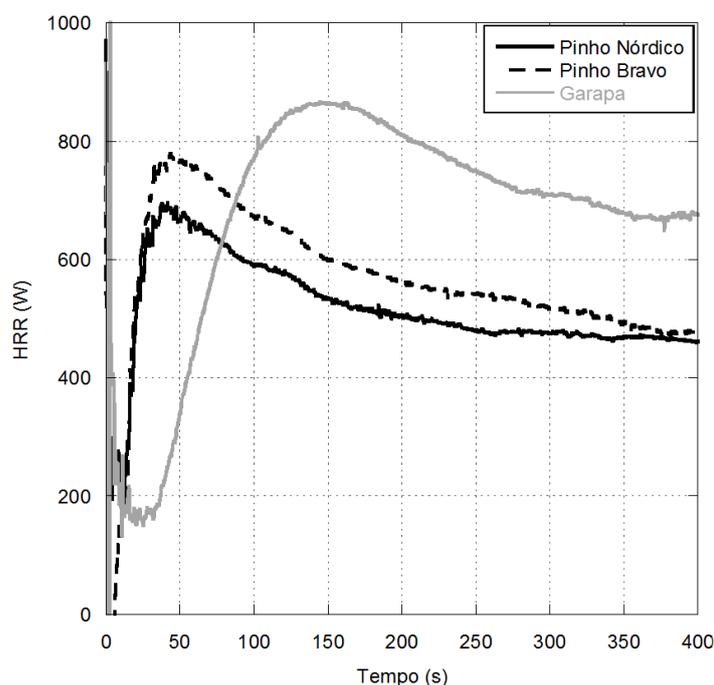


Figura 4.15 Taxa de libertação de calor para as amostras de 20 mm

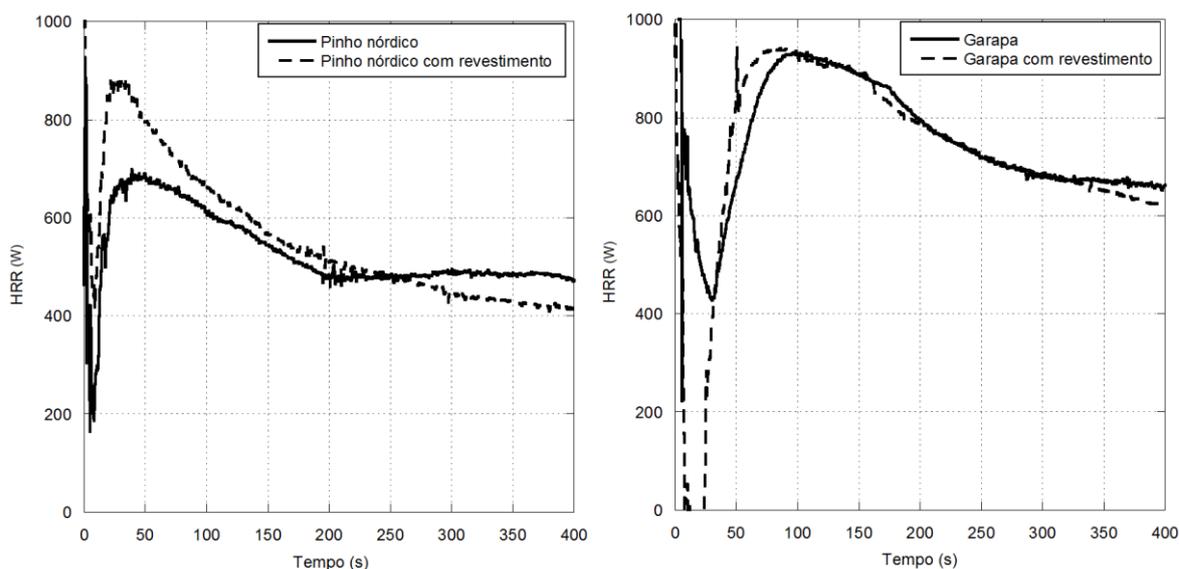


Figura 4.16 Taxa de libertação de calor para amostras com e sem revestimento químico

4.9. Taxa de perda de massa média e energia total libertada

Na tabela 4.3 estão representadas a perda de massa total das amostras, o tempo até extinção, a taxa de perda de massa média e a energia total libertada das amostras desde o início do ensaio até à extinção da chama.

Tabela 4.3 Perda de massa total, tempo até extinção, taxa de perda de massa média e energia libertada

Amostra	Pinho nórdico (20mm)	Pinho bravo (20mm)	Garapa (20mm)	Pinho nórdico (35mm)	Garapa (35mm)	Pinho nórdico com revestimento	Garapa com revestimento
Δm (g)	28,37	32,28	54,26	53,41	86,94	50,87	86,73
Δt (s)	1164	1203	1428	2630	3275	2434	2962
$\frac{\Delta m}{\Delta t}$ (g/s)	0,024	0,027	0,038	0,020	0,026	0,020	0,028
Q (kJ)	498,5	583,8	961,2	938,5	1540,1	893,9	1536,4
q (kJ/kg)	14876	14969	15042	14920	13803	14135	13796

Observou-se uma discrepância relativamente grande na taxa de perda de massa média das amostras da mesma espécie com diferente espessura. Verificou-se que as amostras com menor espessura têm uma taxa de perda de massa média superior à das amostras com maior espessura. No caso do pinho nórdico com espessura de 20 mm verificou-se uma taxa de perda de massa média de 0,024 g/s enquanto que nas amostras da mesma espécie com 35 mm a média da taxa de perda de massa verificada foi de apenas 0,020 g/s. No caso da garapa, a discrepância é ainda mais óbvia, com uma média de 0,038 g/s nas amostras de 20 mm e uma média de 0,026 g/s na taxa de perda de massa das amostras de 35 mm. Entre as diferentes espécies, a garapa é a que revela um valor médio de taxa de perda de massa mais elevado (0,038 g/s) contra os 0,027 g/s do pinho bravo e 0,024 g/s do pinho nórdico. A energia total libertada Q [kJ] foi calculada a partir do produto da variação da massa pelo PCI presente na equação (4.3). Enquanto o pinho bravo

(583,8 kJ) libertou, nas amostras de 20 mm, ligeiramente mais energia até à extinção do que o pinho nórdico (498,5 kJ), a garapa revelou valores de libertação de energia até à extinção muito mais elevados (na ordem dos 961 kJ).

$$Q = \int_0^{t_f} \dot{q} dt = \Delta m \cdot PCI \quad (4.3)$$

De modo a tornar mais fácil a interpretação e comparação do valor de energia total libertada das amostras, adimensionalizou-se este valor relativamente à massa média de cada amostra, obtendo-se a variável q (energia libertada por unidade de massa) expressa em kJ/kg. A conclusão mais assinalável a retirar desta variável foi o decréscimo acentuado da energia libertada por unidade de massa da Garapa quando se aumentou a espessura.

4.10. Discussão final

O pinheiro bravo revelou ser a espécie que mais rapidamente aumentou a sua temperatura à superfície, seguida do pinheiro nórdico, sendo a garapa a espécie com um aumento de temperatura superficial mais lento. As amostras com revestimento revelaram um aumento de temperatura à superfície da amostra mais rápido do que as amostras sem tratamento. O mesmo aconteceu nas amostras com maior espessura, quanto maior a espessura, mais rápido se revelou o aumento da temperatura superficial.

A espécie que demorou menos tempo até entrar em ignição foi o pinho nórdico, enquanto a garapa revelou um tempo de ignição bastante mais elevado do que as duas madeiras de pinho. Nas amostras com maior espessura observou-se um ligeiro decréscimo no tempo de ignição, no entanto, foram as amostras com revestimento que revelaram o tempo de ignição mais baixo.

A amostra que demorou mais tempo até à extinção da chama foi a garapa, sendo o pinho nórdico a amostra cuja chama mais rapidamente se extinguiu. As amostras com revestimento químico revelaram, no entanto, um menor tempo até extinção da chama.

Relativamente ao estudo da perda de massa adimensionalizada, as amostras de garapa revelaram perder massa mais lentamente do que ambas as amostras de pinho.

A espécie que apresentou o menor pico de *heat release rate* (taxa de libertação de calor) foi o pinho nórdico, ao contrário da garapa, que apresentou o maior pico de *HRR*. No entanto, esse pico ocorreu mais tarde do que nas amostras de pinho. Tal facto está relacionado com o maior tempo de ignição que levou a que o aumento brusco típico das taxas de perda de massa fosse mais tardio.

No caso do pinho nórdico o pico máximo da taxa de perda de massa e de *HRR* é bastante superior para as amostras com revestimento. Visto que o mesmo não acontece no caso da garapa, tal facto pode ser explicado pela diferença de tratamento químico utilizado para as duas espécies. A diferença reside no acréscimo de Xylofene no caso do pinho nórdico, que pode assim influenciar o pico de *heat release rate* da amostra.

A garapa foi a espécie que revelou a maior taxa de perda de massa média e a maior quantidade total de energia libertada. Pelo contrário, o pinho nórdico revelou os valores de taxa de perda de massa média e de energia total libertada mais baixos. A taxa de perda de massa média atingiu valores inferiores nas amostras com maior espessura. No caso das amostras com revestimento químico não se observou uma influência nítida nem na taxa de perda de massa média, nem no valor de energia total libertada, relativamente às amostras sem tratamento.

5. CONCLUSÕES

Três espécies de madeira foram estudadas com o intuito de determinar e avaliar comparativamente os seus parâmetros de inflamabilidade e de combustão. No decorrer do trabalho foram realizados testes em calorímetro de bomba de oxigénio e em calorímetro cónico para determinar os referidos parâmetros. Foi posteriormente feita a análise e discussão dos resultados obtidos. Este capítulo é uma súmula das conclusões referentes à reação ao fogo das espécies de madeira estudadas que foram sendo referidas ao longo do capítulo 4.

5.1. Avaliação de resultados

Foram obtidos os parâmetros de inflamabilidade e combustão, nomeadamente tempo até à ignição, tempo até extinção da chama, taxa de perda de massa, taxa de libertação de calor e energia total libertada das espécies de madeira *Apuleia leiocarpa* (garapa), *Pinus pinaster* (pinheiro bravo) e *Pinus sylvestris* (pinheiro nórdico).

As espécies com densidade mais baixa apresentaram tempos de ignição mais curtos. A garapa demorou muito mais tempo a entrar em ignição do que as duas espécies de pinho, o que é um bom indicador da garapa relativamente à sua resistência ao fogo.

A gama de valores obtida nos ensaios para a temperatura à superfície no momento de ignição (entre 105 e 175 °C) não corrobora a teoria de Babrauskas (2002) que referiu uma temperatura de ignição com chama piloto para a madeira entre 210 e 497 °C.

Todas as espécies revelaram um comportamento típico de partículas termicamente espessas, visto que existiu em todas as amostras um gradiente enorme entre as duas faces da amostra durante os ensaios. No entanto, o aumento de temperatura transmitiu-se mais rapidamente através das amostras com menor densidade, ou seja, as espécies com menor densidade revelaram ter maior condutividade térmica.

Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com a solução analítica para a equação de condução de calor em regime transiente e unidimensional, para

o caso de um sólido semi-infinito sujeito a um fluxo de calor superficial constante. Obteve-se uma aproximação bastante razoável na previsão analítica da evolução de temperatura no interior das amostras, especialmente no caso das amostras de garapa.

As espécies cuja ignição se deu mais cedo revelaram um menor tempo até à extinção. O menor tempo até extinção das amostras de pinho nórdico é favorável, principalmente em caso de deteção tardia de incêndio devido à sua maior rapidez de autoextinção.

O pinho nórdico revelou a menor taxa de perda de massa média. Este parâmetro favorece o uso de pinho nórdico na medida em que uma baixa taxa de perda de massa média traduz-se numa menor quantidade de gases tóxicos inalados e numa degradação mais lenta do material. A taxa de libertação de calor (*heat release rate*) seguiu uma tendência similar à da taxa de perda de massa.

Relativamente à energia total libertada, a garapa libertou cerca do dobro da energia das amostras de pinho, sendo o pinho nórdico a espécie que libertou menos energia.

No decorrer do trabalho foi avaliada a influência da espessura e da existência de tratamento químico nos parâmetros de reação ao fogo determinados.

As amostras com revestimento químico entraram em ignição muito mais rapidamente (~25 a 27%) do que as amostras sem revestimento, o que revela a maior inflamabilidade de madeiras com tratamento químico.

As amostras com maior espessura, apesar de um tempo até ignição ligeiramente mais baixo (~9%), revelaram um aumento de temperatura mais lento nas zonas a 5 e 15 mm da superfície e uma taxa de perda de massa média ligeiramente mais lenta do que a das amostras com menor espessura, o que demonstra que um ligeiro aumento da espessura pode fazer uma diferença significativa na temperatura das paredes interiores de um edifício e na quantidade de gases tóxicos inalados por seres humanos em caso de incêndio.

Da análise dos resultados obtidos concluiu-se que a garapa é a espécie que apresenta menor risco de inflamabilidade, revelando no entanto características de combustão em chama que a desfavorecem relativamente às espécies de pinho.

5.2. Propostas de trabalho futuro

Dando seguimento a este estudo, poderão ser realizados no futuro testes de determinação de potência tóxica para espécies de madeira com interesse para a construção de edifícios. Os parâmetros de inflamabilidade e combustão obtidos neste estudo poderão também no futuro ser comparados com os de outras espécies de madeira ou até mesmo com aglomerados de madeira utilizados em construção. Uma espécie que seria um bom objeto de estudo visto ser bastante abundante e de uso frequente na construção no nosso país, mais especificamente nos Açores, seria a *Cryptomeria japonica*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atreya, A., Abu-Zaid, M. (1991), “Effect of environmental variables on piloted ignition” Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science, 177-186.
- Atreya, A., Carpentier, C., Harkleroad, M. (1986), “Effect of sample orientation on piloted ignition and flame spread” Fire Safety Science, 1, 97–109.
- Babrauskas, V. (2002) “Ignition of wood: a review of the state of the art”, Journal Fire Protection, 12, 163-189.
- Babrauskas, V. (2003), “Ignition Handbook” Fire Science Publishers
- Bryant, R., Mulholland, G. (2008), “A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests” Fire Mater, 32, 121-139.
- Çengel, Y. (2006), “Heat and Mass Transfer: a practical approach”, McGraw-Hill, 3ª ed., ISBN 007-125739-X.
- Decisão nº 406/2009/EC do Parlamento Europeu, Official Journal of the European Union.
- EN 14918 (2009), “Solid Biofuels – Determination of calorific value” European Committee for Standardization.
- EN 13501-1 (2007), “Fire test to building material” European Committee for Standardization.
- Gustavsson, L., Sathre, R. (2006), “Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials” Building and Environment, 41, 940-951
- Haseli, Y., van Oijen, J.A., de Goey, L.P.H. (2012), “Analytical solutions for prediction of the ignition time of wood particles based on a time and space integral method” Thermochemica Acta, 548, 65–75.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., Lavine, A. (2007), “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 6th ed., ISBN: 0-471-45728-0.
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (Fevereiro de 2013) “6º Inventário florestal nacional – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental”.
- ISO 5660-1 (2002), “Reaction to fire tests” International Organization for Standardization
- Janssens, M. (1991), “Piloted ignition of wood: a review” Fire Mater, 15, 151-167.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2011), “Caracterização da oferta de casas de madeira em Portugal - Inquérito às empresas de projecto, fabrico, construção e comercialização”, Relatório 118/2011.
- Lamorlette, A. (2014), “Quantification of ignition time uncertainty based on the classical ignition theory and Fourier analysis” Comptes Rendus Mécanique, 342, 459-465.

- MacLean, J.D. (1941), "Thermal conductivity of wood" *ASHVE*, 47, 323-354.
- McAllister, S., Grenfell, I., Hadlow, A., Jolly, W.M., Finney, M., Cohen J. (2012), "Piloted ignition of live forest fuels" *Fire Safety Journal*, 51, 133-142.
- Mendes, R., (2011), "Métodos Laboratoriais" Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, Engenharia e Segurança ao Incêndio.
- Momoh, M., Horrocks, A. R., Ehoatu, A. N., Kolawoled, E. G. (1996), "Flammability of tropical woods-Investigation of the burning parameters " *Polymer Degradation and Stability*, 54, 403-411.
- Morgado, L., Pedro, B., Cruz, H., Pontífice, P. (2012), "Projecto e construção de casas de madeira em Portugal".
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W. (2014), "Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings" *Construction and building materials*, 52, 428-436.
- Parr Operating Instruction Manual No. 204 M "Instructions for the 1341 plain jacket oxygen bomb calorimeter".
- Reszka, P., Borowiec, P., Steinhaus, T., Torero, J.L. (2012), "A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling" *Combustion and Flame*, 159, 3652-3657.
- Shi, L., Chew, M. (2013), "Fire behaviors of polymers under autoignition conditions in a cone calorimeter" *Fire Safety Journal*, 61, 243-253.
- Shultmann, F., Hiete, M., Kuehlen, A., Ludwig, J., Beerbuehl, S., Stengel, J. (2010), "Collection of background information for the development of EMAS pilot reference sectoral documents: The Construction Sector"
- Simms, D. L., Law, M. (1967), "The ignition of wet and dry wood by radiation" *Fire Research Note*, 11, 377-388.
- Spearpoint, M.J., Quintiere, J.G. (2000), "Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model - effect of species, grain orientation and heat flux", 36, 391-415.
- Telmo C., Lousada J., Moreira N. (2010), "Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood" *Bioresource Technology*, 101, 3808-3815.
- Thomson, H.E., Drysdale, D.D., Beyler, C.L. (1988), "An experimental evaluation of critical surface temperature as a criterion for piloted ignition of solid fuels", *Fire Safety Journal*, 13, 185-196.
- Torero, J. (2008), "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", fourth ed. National Fire Protection Association, 260-277.
- van Blijderveen, M., Bramer, E., Brem G. (2012), "Modelling piloted ignition of wood and plastics" *Waste Management*, 32, 1659-1668

ANEXO A

Garantias contratadas	Capital	Prémio comercial anual
Imóvel - Incêndio, Queda de Raio e Explosão	165.000,00 €	29,74 €
Imóvel - Tempestades	165.000,00 €	10,69 €
Imóvel - Inundações	165.000,00 €	15,38 €
Imóvel - Aluimentos de terras	165.000,00 €	0,59 €
Imóvel - Demolição e remoção de escombros	1.500,00 €	0,05 €
Imóvel - Privação temporária uso local arrendado	1.500,00 €	0,10 €
Imóvel - Perda de rendas	1.500,00 €	0,03 €
Imóvel - Resp.Civil-Propriet. Inquilino/Ocupante	15.000,00 €	0,77 €
Imóvel - Efeitos directos da corrente eléctrica	1.500,00 €	10,71 €
Imóvel - Greves,tumultos e alter. da ordem pública	165.000,00 €	0,05 €
Imóvel - Queda de aeronaves	165.000,00 €	0,05 €
Imóvel - Choque/impacto de veíc.terrestres/animais	165.000,00 €	0,01 €
Imóvel - Danos por água	165.000,00 €	28,52 €
Imóvel - Derr.acid.fluidos de apar. aquec./arref.	165.000,00 €	0,03 €
Imóvel - Quebra ou queda de antenas	1.500,00 €	0,03 €
Imóvel - Quebra de vidros, espelhos e pedras márm.	1.500,00 €	0,24 €
Imóvel - Quebra ou queda de painéis solares	1.500,00 €	0,03 €
Imóvel - Danos por fumo ou calor	1.500,00 €	0,18 €
Imóvel - Honorários de técnicos e decoradores	1.500,00 €	0,11 €
Imóvel - Danos no imóvel por furto qualif./roubo	1.500,00 €	0,59 €
Imóvel - Quebra acidental de loiça sanitária	1.500,00 €	0,05 €
Imóvel - Pesquisa de avarias e rupturas	1.500,00 €	14,26 €
Imóvel - Actos de vandalismo	165.000,00 €	0,18 €
Imóvel - Assistência no lar		2,96 €
Imóvel - Danos estéticos	1.500,00 €	0,42 €
Imóvel - Protecção jurídica		2,38 €
Imóvel - Assistência animais domésticos		0,59 €
Protecção Pagamento do Prémio		0,00 €
		Total : 118,74 €

PRÉMIO	
Prémio total do recibo	139,39 €
Período do recibo	2014/07/24 a 2015/07/23
Prémio total do recibo seguinte	133,74 €
Prémio total anual	139,39 €

VOLTAR

[1] 22.6 O Pack Inundações e Tempestades encontra-se incluído nas coberturas contratadas. Caso não pretenda este pack, deve alterar simulação.

[1] 22.6 A não inclusão deste Pack equivale a uma redução média de 20% no prémio

[1] 22.6 Tipo de Construção 3º Risco. Contactar Delegação.