

**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS**

**PROPRIEDADES CALORIMÉTRICAS E DE
TRANSPORTE DE ÁGUA NA MADEIRA**



Ricardo Manuel Costa Ferraz

Vila Real, Dezembro de 2011

Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Amadeu Duarte da Silva Borges e Co-orientação científica do Professor Doutor José Joaquim Lopes Morais, ambos do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Aos meus Pais, Carlos e Margarida

À minha Irmã, Carla,

À minha Namorada, Ângela

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais pela oportunidade que me deram, pelos esforços e sacrifícios que passaram pelo meu bem-estar, e pelo constante apoio e encorajamento.

Um sincero agradecimento aos meus orientadores, os Professores Amadeu Borges e José Morais pela sua inteira disponibilidade na orientação desta Dissertação.

Uma especial palavra de apreço e gratidão ao Professor Amadeu Borges, por toda a ajuda ao longo do decurso deste trabalho. Ao Professor José Morais pelas sugestões indicadas.

À minha namorada, Ângela Vaz Alves, por todo o incentivo que sempre me estimula a crescer científica e pessoalmente, pela paciência e compreensão reveladas ao longo destes anos.

Aos meus amigos Pedro Silva, Joaquim Maeiro, Bruno Diaquino e João Pereira, que ao longo destes anos me acompanharam na vida e no decorrer do curso. Um agradecimento especial por toda a amizade e camaradagem, pela paciência e apoio.

Por fim agradeço à UTAD, pela disponibilização das infra-estruturas necessárias à realização deste trabalho, em especial na facilidade de acesso aos laboratórios, equipamentos e materiais.

Agradeço a todos os quantos de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho e não foram nomeados anteriormente.

A todos, o meu muito Obrigado!

Resumo

Este trabalho tem por objectivo contribuir para um maior conhecimento sobre as propriedades calorimétricas da madeira de pinho marítimo (*Pinus pinaster* Ait.).

Ao longo do trabalho, foram realizados ensaios calorimétricos, com o intuito de determinar o PCI, em amostras de estilha de madeira, com distinção do lenho inicial e do lenho final, e previamente saturadas de água em condições higrotérmicas estáticas (quatro temperaturas e seis humidades relativas diferentes). Os resultados experimentais foram comparados com modelos analíticos de previsão do PCI.

Utilizaram-se dois métodos distintos para modelar a relação entre o PCI e o teor de humidade, a partir dos resultados experimentais: a interpolação polinomial, através das diferenças divididas de Newton, e o método de regressão linear. Posteriormente, estes modelos foram comparados aos valores obtidos pelos modelos analíticos disponíveis na literatura, para assim se poder encontrar uma expressão genérica do PCI em função do teor de humidade. Verificou-se que, não existe necessidade de distinção do lenho (lenho inicial ou lenho final), nem da temperatura, na determinação do PCI em função do teor de humidade. Concluiu-se que, o modelo que melhor descreve essa função é o modelo obtido através da regressão linear, dado pela expressão $PCI = -0,1767W + 16,872$. Constatou-se que a humidade relativa influencia directamente o valor final do PCI, enquanto, no caso do factor temperatura, o mesmo não se verifica.

Abstract

This work aims to contribute to a better understanding of the calorimetric properties of maritime pine wood (*Pinus pinaster Ait.*).

Throughout the work, calorimetric tests were performed in order to determine the PCI, in samples of wood chips, with distinction between earlywood and latewood, previously saturated under static hygrothermal conditions (six temperatures and four different relative's humidities). The experimental results were compared with analytical models for determining the PCI.

From the experimental results, we used two different methods for modelling the PCI as a function of moisture content: polynomial interpolation, using the Newton divided differences, and linear regression. Later, these models were compared to values obtained by analytical models available in the literature. It was found that there is no need to distinguish between earlywood and latewood, and also between the conditioning temperatures under which the samples were saturated with water. It was concluded that the model that best describes this phenomenon was obtained by linear regression, given by the expression $PCI = -0,1767W + 16,872$. It was found that the relative humidity directly influence the final value of the PCI, while in the case of the temperature factor, the same is not true.

ÍNDICE GERAL

Resumo	V
Abstract	VI
Nomenclatura	XI
Índice de Figuras	XIV
Índice de Tabelas	XVII

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1.	Introdução	1
1.2.	Importância da madeira no contexto nacional	2
1.3.	Bioenergia e biomassa	3
1.4.	Situação da biomassa florestal em Portugal	6
1.5.	Propriedades físicas da biomassa sólida	8
1.6.	Combustão da biomassa	9
1.7.	Reacções durante a combustão de biomassa	10
1.8.	Objectivos	12
1.9.	Conteúdo da Tese	13

Capítulo 2

ESTRUTURA E HIGROSCOPICIDADE DA MADEIRA

2.	Estrutura da Madeira	15
2.1.	Estrutura macroscópica da madeira resinosa	18
2.2.	Estrutura microscópica	20
2.3.	Propriedades físicas da madeira	22
2.3.1.	Teor de humidade	22
2.3.2.	Higroscopicidade da Madeira	23
2.3.3.	Massa Volúmica	24
2.3.4.	Composição Química	25
2.4.	Influência do teor de humidade no poder calorífico	27

Capítulo 3

TRABALHO EXPERIMENTAL

3.	Trabalho Experimental	29
3.1.	Obtenção de serrim dos lenhos	30
3.2.	Controlo higrotérmico das amostras	30
3.3.	Determinação do PCS da estilha	34

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.	Introdução	37
4.1.	Ensaio Calorimétrico	38

Capítulo 5

MODELAÇÃO MATEMÁTICA

5.1.	Modelação matemática	42
5.1.1.	Modelos matemáticos em função da composição química	44
5.1.2.	Modelos matemáticos em função do teor de humidade	46
5.1.3.	Modelos matemáticos em função do teor de humidade e composição química	48
5.2.	Correlação dos modelos matemáticos com os valores experimentais	49
5.2.1.	Correlação de modelos matemáticos em função da composição química	54
5.2.2.	Correlação de modelos matemáticos em função da humidade e composição química	58
5.2.3.	Correlação de modelos matemáticos em função do teor de humidade	64

Capítulo 6

DETERMINAÇÃO DA EXPRESSÃO PARA O PCI

6.1.	Determinação da expressão para o PCI	71
6.1.1.	Obtenção através da interpolação das diferenças divididas de Newton de um modelo para o PCI	71
6.2.	Regressão Linear	83
6.3	Comparação dos métodos de modelação	95
6.3.1.	Comparação modelos experimentais	95
6.3.2.	Comparação entre o modelo de regressão linear com os modelos teóricos	99

Capítulo 7

CONCLUSÕES

7.1.	Resultados experimentais	103
7.2.	Modelos analíticos	104
7.3.	Modelação matemática dos resultados experimentais	105
7.4	Trabalho futuro	106

ANEXOS

TABELAS EXPERIMENTAIS DE PCS

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS

ASH	Teor de Cinzas (%)
EU	União Europeia
FC	Carbono fixo (%)
HR	Humidade relativa (%)
PCI	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
PCI_{bs}	Poder Calorífico Inferior base seca (MJ/kg)
PCS	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
PSF	Ponto de saturação das fibras
TUE	Teor de humidade de equilíbrio (%)
VM	Matéria volátil (%)

SIMBOLOGIA

Al_2O_3	Óxido de alumínio
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
D_h	Massa Volúmica (g/cm^3)
Fe_2O_3	Óxido de ferro

F_c	Teor de Carbono fixo (%)
h_g	Entalpia vapor saturado (KJ/kg.K)
h_f	Entalpia líquido saturado (KJ/kg.K)
K_2O	Óxido de potássio
KI	Iodeto de potássio
KCl	Cloreto de potássio
$LiCl$	Cloreto de lítio
L_v	Calor latente de vaporização (KJ/kg)
M_e	Teor de água (%)
$MgCl_2$	Dicloreto de magnésio
$NaBr$	Brometo de sódio
N_2O	Óxido nitroso
$NaCl$	Cloreto de sódio
P_h	Peso do provete de madeira para o teor em água h
SiO_2	Dióxido de silício
T	Temperatura (°C)
T_c	Teor de carbono (%)
T_g	Transição vítrea
T_h	Teor de hidrogénio (%)
T_o	Teor de oxigénio (%)
T_N	Teor de azoto (%)
T_s	Teor de enxofre (%)
V_h	Volume do provete de madeira para o teor em água h

V_m	Teor de Matéria volátil (%)
W	Teor de humidade (%)
ρ	Massa específica básica (g/cm ³)

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1.1: Contribuição das várias fontes de energia para a produção mundial de energia primária em 1973 e 2005 4
- Figura 1.2: Distribuição do eucalipto, pinheiro bravo e sobreiro em Portugal continental 7
- Figura 1.3: Valores de poder calorífico em função do teor de humidade para diversos tipos de biomassa 9
- Figura 1.4: Perda de massa (%) ao longo do tempo (s) durante a combustão de madeira 11

Capítulo 2

- Figura 2.1: Esquema tridimensional da madeira das espécies resinosas 16
- Figura 2.2: Esquema tridimensional da madeira das espécies folhosas 17
- Figura 2.3: Esquema da madeira da espécie folhosa 18
- Figura 2.4: Características gerais de um tronco de uma resinosa 19
- Figura 2.5: Disposição do lenho inicial, lenho final e canais de resina num anel de crescimento 20
- Figura 2.6: Esquema dos traqueídeos longitudinais pertencentes ao lenho 21
- Figura 2.7: Isotérmicas higroscópicas mostrando a relação entre a humidade relativa e a humidade de equilíbrio a diferentes temperaturas 24

Capítulo 3

Figura 3.1: Etapas de preparação das amostras: (a) cubo de madeira; (b) lenho final (A) e lenho inicial (B); (c) moinho 31

Figura 3.2: Secagem prévia das amostras: (a) recipiente com as amostras; (b) estufa de vácuo 32

Figura 3.3: Ensaios de absorção: (a) Recipientes com as amostras; (b) Esquema de montagem dos vários elementos na caixa hermética (1 – Caixa hermética; 2 – Estilha de lenho final; 3 – Estilha de lenho inicial; 4 – Recipiente plástico; 5 – Apoios de suporte à rede; 6 – Solução aquosa; 7 – Rede de plástico) 33

Figura 3.4: Calorímetro “PARR 6300” 35

Figura 3.5: (a) Pesagem da amostra e (b) porta-amostra do calorímetro 35

Capítulo 4

Figura 4.1: Valores médios de PCS para o lenho inicial em função do teor de água (%) 40

Figura 4.2: Valores médios de PCS para o lenho final em função do teor de água (%) 41

Capítulo 5

Figura 5.1: Diagrama T-S 50

Capítulo 6

Figura 6.1: Curvas experimentais do PCI para o lenho inicial, temperatura de 35°C e 45°C 83

Figura 6.2: Curvas experimentais de PCI para o lenho final, temperatura de 35°C e 45°C	84
Figura 6.3: Figura 6.3: Curvas experimentais do PCI para o lenho inicial, temperatura de 55°C e 65°C	87
Figura 6.4: Curvas experimentais do PCI para o lenho final, temperatura de 55°C e 65°C	88
Figura 6.5: Valores médios de PCI para o lenho inicial e lenho final	91
Figura 6.6: Valores médios de PCI	94

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1: Poder calorífico inferior de combustíveis sólidos e líquidos 4

Tabela 1.2: Propriedades físicas e químicas típicas de biomassa e carvão 7

Tabela 1.3: Principais fenômenos da combustão da Biomassa 9

Capítulo 2

Tabela 2.1: Composição Química de duas espécies de madeira 27

Capítulo 3

Tabela 3.1: Humidades Relativas 34

Capítulo 4

Tabela 4.1: Valores médios de PCS para cada temperatura e humidade relativa 38

Tabela 4.2: Teor de água no interior da amostra 39

Capítulo 5

Tabela 5.1: Composição química da madeira *Pinus pinaster* 43

Tabela 5.2: Calor latente de vaporização	51
Tabela 5.3: Valores de PCS para o lenho inicial	51
Tabela 5.4: Valores de PCS para o lenho final	51
Tabela 5.5: Valores de PCI para o lenho inicial	52
Tabela 5.6: Valores de PCI para o lenho final	52
Tabela 5.7: Valores de PCI do lenho inicial	53
Tabela 5.8: Valores de PCI para o lenho final	53
Tabela 5.9: Valores de PCI modelados em função da composição química	55
Tabela 5.10: Valores de PCI modelados e comparados com o lenho inicial final	55
Tabela 5.11: Valores de PCS modelados em função da composição química	56
Tabela 5.12: Valores de PCS modelados em comparação com o lenho inicial e final	57
Tabela 5.13: Valores de PCI para a temperatura de 35°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro)	58
Tabela 5.14: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 35°C (Modelo/Erro)	58
Tabela 5.15: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 35°C (Modelo/Erro)	59
Tabela 5.16: Valor de PCI para a temperatura de 45°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro)	60
Tabela 5.17: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 45°C (Modelo/Erro)	60

Tabela 5.18: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 45°C (Modelo/Erro)	61
Tabela 5.19: Valor de PCI para a temperatura de 55°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro)	61
Tabela 5.20: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 55°C (Modelo/Erro)	61
Tabela 5.21: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 55°C (Modelo/Erro)	62
Tabela 5.22: Valor de PCI para a temperatura de 65°C, para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro)	62
Tabela 5.23: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 65°C (Modelo/Erro)	63
Tabela 5.24: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 65°C (Modelo/Erro)	63
Tabela 5.25: Valor de PCI para o modelo de Gato et al (2003) para a temperatura de 35°C	64
Tabela 5.26: Valor de PCI para o modelo de Gato et al (2003) para a temperatura de 45°C	65
Tabela 5.27: Valor de PCI para o modelo de Gato et al (2003) para a temperatura de 55°C	65
Tabela 5.28: Valor de PCI para o modelo de Gato et al (2003) para a temperatura de 65°C	66
Tabela 5.29: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 35°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	66
Tabela 5.30: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 35°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	67
Tabela 5.31: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 45°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	67
Tabela 5.32: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 45°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	68
Tabela 5.33: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 55°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	68

Tabela 5.34: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 55°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	68
Tabela 5.35: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 65°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	69
Tabela 5.36: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 65°C, obtido pelo modelo de Gomes et al	69

Capítulo 6

Tabela 6.1: Tabela de cálculo do polinómio das diferenças divididas de Newton.	73
Tabela 6.2: Expressões de PCI através do método de Newton para o lenho inicial.	74
Tabela 6.3: Expressões de PCI através do método de Newton para o lenho final.	74
Tabela 6.4: Expressão genérica para o PCI.	75
Tabela 6.5: Valores teóricos de PCI (MJ/kg).	75
Tabela 6.6: Modelo matemático versus valores experimentais para o lenho inicial.	76
Tabela 6.7: Modelo matemático versus valores experimentais para o lenho final.	76
Tabela 6.8: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água do lenho inicial.	77
Tabela 6.9: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água do lenho final.	78
Tabela 6.10: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água.	79
Tabela 6.11: Expressão genérica para o PCI.	80
Tabela 6.12: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água do lenho inicial.	80

Tabela 6.13: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água do lenho final.	81
Tabela 6.14: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água, sem distinção do lenho.	82
Tabela 6.15: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 35°C.	85
Tabela 6.16: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 35°C.	85
Tabela 6.17: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 45°C.	86
Tabela 6.18: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 45°C.	86
Tabela 6.19: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 55°C.	89
Tabela 6.20: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 55°C.	89
Tabela 6.21: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 65°C.	90
Tabela 6.22: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 65°C.	90
Tabela 6.23: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI para o lenho inicial.	92
Tabela 6.24: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI para o lenho final.	93
Tabela 6.25: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI.	95
Tabela 6.26: Comparação dos erros cometidos pelos métodos de determinação do PCI para o lenho inicial.	96
Tabela 6.27: Comparação dos erros cometidos pelos métodos de determinação do PCI para o lenho final.	97
Tabela 6.28: Comparação dos erros cometidos pelas expressões de PCI sem distinção do lenho.	98

Tabela 6.29: Comparação dos erros apresentados pelos modelos para o lenho inicial (%)	100
Tabela 6.30: Comparação dos erros apresentados pelos modelos para o lenho final (%)	101
Tabela 6.31: Comparação dos erros apresentados pelos modelos sem distinção de lenho (%)	102

Capítulo 1

Introdução

Ao longo do presente capítulo pretende-se realizar uma introdução ao tema da dissertação, explicando a importância da madeira de *Pinus pinaster* no contexto nacional. Serão abordadas as características inerentes à biomassa sólida, bem como o processo de combustão e as suas fases durante a queima da biomassa.

1.1. Introdução

A madeira é um material higroscópico, absorvendo ou libertando água para a atmosfera, em função do seu próprio teor de humidade e da humidade relativa ambiente. A água pode encontrar-se no interior da madeira em dois estados: água de capilaridade, que se encontra nos lúmens das células, e água de adesão ou higroscópica, que se encontra no interior das paredes das células (Tsoumis, 1991).

A biomassa florestal, que inclui os resíduos de madeira provenientes da indústria, bem como a lenha e os resíduos florestais provenientes da limpeza das florestas, constitui uma importante fonte primária e renovável de energia. É hoje

reconhecido o contributo importante que a valorização deste recurso energético pode ter na economia nacional.

A percentagem de humidade influencia significativamente a qualidade de combustão e o poder calorífico da biomassa, pelo que uma etapa fundamental na exploração energética da biomassa florestal é a sua secagem prévia. Com este trabalho pretende-se contribuir para a avaliação do efeito do teor de água no poder calorífico da madeira de *Pinus pinaster*.

1.2. Importância da madeira no contexto nacional

Em Portugal, a madeira exerce um papel muito importante na economia. De acordo com o último inventário florestal Nacional (IFN5), realizado pela Direcção Geral dos Recursos Florestais, entre 2005 e 2006, a floresta nacional ocupa uma área de aproximadamente 3,4 milhões de *ha*, representando cerca de 38,4 % do território nacional. Destes, $976 \times 10^3 ha$ são ocupados por pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), sendo a espécie com maior representatividade no nosso país e largamente utilizada na construção, tanto para interiores como para obras expostas ao ar livre, devido às suas características de resistência, trabalhabilidade e facilidade de tratamento com produtos preservadores. Para além da construção civil, a madeira é utilizada para lenha, carvão, pasta de papel, e ainda resina. Deste modo, o pinheiro bravo é uma espécie de grande importância económica a nível nacional (Alexandre, 2009).

Os produtos florestais representam uma média de 20% do valor total das exportações portuguesas; em contraste, as importações representam apenas cerca de 2% do total da madeira usada, e dizem respeito principalmente à utilização de madeiras folhosas tropicais em carpintaria e mobiliário. Estes números fazem de Portugal um dos poucos membros da Comunidade Europeia com um balanço florestal positivo (Branco et al, 2005).

1.3. Bioenergia e biomassa

A bioenergia é a energia que deriva da biomassa, sendo esta definida como toda a matéria de origem biológica, excluindo a que está retida em formações geológicas e transformada em fóssil (Netto, 2008). Pode ser classificada em três categorias principais, quanto à sua forma:

- Biocombustíveis sólidos,
- Biocombustíveis líquidos;
- Biocombustíveis gasosos.

Os primeiros são constituídos pela biomassa lenhosa, biomassa herbácea, biomassa de fruta e misturas. Os biocombustíveis líquidos, por sua vez, englobam principalmente o biodiesel e o bioetanol. O biogás, proveniente na sua maioria da digestão anaeróbia de biomassa sólida, completa as categorias da bioenergia (Netto, 2008).

A biomassa florestal refere-se a toda a matéria florestal que é passível de ser utilizada para fins energéticos. Cabem nesta definição a rolaria, os cepos, os ramos e as folhas, embora nem todas estas fracções sejam ou devam ser utilizadas. A biomassa florestal residual consiste na fracção da biomassa florestal que é produzida como resíduo das operações de exploração florestal (podas, desbastes, cortes, etc.) e refere-se aos topos, ramos (incluindo folhas ou agulhas) e cepos.

A biomassa, enquanto recurso energético, desempenha actualmente um papel de pouca importância nas economias dos países desenvolvidos, ao contrário do que já aconteceu no passado. A Revolução Industrial despoletou não só o crescimento da produção de energia através do carvão, mas também o aumento exponencial da população e da actividade económica e, consigo, acarretam necessidades energéticas crescentes. Apesar de já haver produção de energia a partir de petróleo na primeira metade do século XX, só a seguir à II Guerra Mundial é que esta ganhou a relevância que ainda hoje tem na economia mundial. Através da Figura 1.1, verifica-se que nas últimas décadas a evolução tem sido no sentido da diversificação das fontes de energia, assumindo a energia nuclear e o gás natural maior expressão (Netto, 2008).

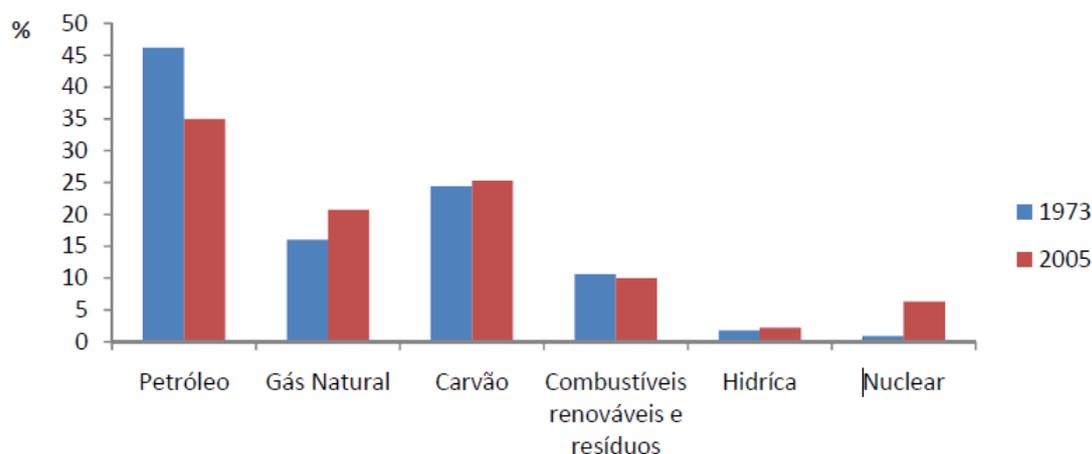


Figura 1.1: Contribuição das várias fontes de energia para a produção mundial de energia primária em 1973 e 2005 (IEA, 2007a)

O decréscimo do uso da biomassa, desde a Revolução Industrial, tem várias razões práticas. Por um lado, comparando a densidade energética da biomassa com a de outros combustíveis, constata-se que a sua conversão para energia é das mais ineficientes. Recorrendo à Tabela 1.1 pode constatar-se que, quando comparada com o petróleo, é necessário um peso 4,5 vezes superior ou um volume 12,5 vezes superior de biomassa florestal residual para obter a mesma quantidade de energia.

Tabela 1.1: Poder calorífico inferior de combustíveis sólidos e líquidos (Netto, 2008)

Combustível	PCI (GJ/m ³)	PCI (GJ/ton)	tep/ton
Diesel	35,4	42,9	1,00
Biodiesel	32,8	37,3	0,87
Óleo de colza	34,3	37,5	0,87
Gasolina	31,9	42,9	1,00
Bioetanol	21,2	26,7	0,62
Biomassa florestal residual (estilha, 40% de humidade)	2,9	9,5	0,22
Pellets (8-9% de humidade)	10,2	16,9	0,39
Carvão Betuminoso	-	26,6	0,62
Carvão Sub-betuminoso	-	17,2	0,40
Petróleo (crude)	36,4	42,9	1,00
Gás Natural	21,9	43,8	1,02

O transporte da biomassa, especialmente no caso de rama e cepos não triturados, é particularmente desvantajoso quando comparado com o transporte de um líquido, seja por camião, navio ou conduta. A evolução para combustíveis de maior densidade energética e na forma líquida representa, assim, uma alteração natural das economias na procura de eficiência. Por outro lado, a distribuição dispersa da biomassa torna o

aproveitamento deste recurso muito oneroso em comparação com algumas das suas alternativas, nas quais o recurso está concentrado em jazidas. São estas as principais causas que fazem da biomassa uma fonte de energia mais cara relativamente às suas alternativas e que transformaram a sua importância de uma situação quase exclusiva para cerca de 3,5% da produção de energia primária nos países da OCDE, em 2005 (IEA, 2007a).

É frequente, a sociedade considerar a biomassa como uma fonte de energia que caracteriza os países menos desenvolvidos. A aceitação da biomassa como fonte de energia renovável apresenta padrões distintos na Europa. Segundo um estudo realizado pela Comissão Europeia (2006), 55% dos cidadãos europeus são a favor da utilização da biomassa, sendo a energia renovável com a pior aceitação. Na análise dos resultados do inquérito por país, Portugal tem uma aceitação de 49%, enquanto países como a Alemanha, Áustria e Dinamarca têm uma aceitação superior a 70%. Parte destas diferenças pode ser explicada pelo facto de nesses países existirem já modernas soluções de aquecimento doméstico a biomassa (Netto, 2008).

Este súbito interesse na biomassa, ainda que seja um sector em que muitos países tenham já apostado há mais de duas décadas, é o resultado de um conjunto de circunstâncias que privilegiou não só a energia a partir da biomassa, mas todas as energias renováveis.

A causa mais relevante para o crescimento actual e potencial da biomassa são as alterações climáticas. A comunidade científica admite que o principal responsável pelo aumento dos gases de estufa na atmosfera são os combustíveis fósseis, provocando o aumento da temperatura média global do planeta.

A biomassa apresenta um ponto bastante positivo relativamente às emissões para a atmosfera: apenas as emissões de N_2O e CH_4 devem ser contabilizadas nos inventários, sendo por isso considerada uma fonte de energia neutra em emissões de CO_2 . Também no mercado europeu de licenças de emissão, a biomassa é considerada neutra em termos de CO_2 .

1.4. Situação da biomassa florestal em Portugal

Portugal continental tem cerca de 33000 km² de floresta, o que corresponde a cerca de 37% do território nacional (Netto, 2008). A floresta portuguesa apresenta contextos consideravelmente diferentes de norte a sul do país. Segundo a 3ª Revisão do Inventário Florestal Nacional, as espécies com maior representatividade são o pinheiro bravo, o eucalipto e o sobreiro, e representam 30%, 21% e 20% da área florestal em Portugal continental, respectivamente. Como se pode observar na Figura 1.2, a distribuição das espécies é bastante heterogénea. O montado de sobreiro está maioritariamente presente a sul do Tejo, nos distritos de Beja, Évora, Santarém e Setúbal. O eucalipto está distribuído numa faixa ao longo do rio Tejo e, de Norte a Sul, no litoral, em particular nos distritos de Aveiro, Coimbra e Viseu. O pinheiro bravo apresenta-se principalmente a norte do Tejo, especialmente na zona Centro, nos distritos de Leiria e Castelo Branco (Netto, 2008).

Ao longo do trabalho apresentado por Carlos Netto (2008), é efectuada uma caracterização da superfície florestal a nível nacional:

- Aproximadamente 75% da superfície florestal de Portugal continental pertence a proprietários florestais privados;
- Cerca de 67% dos proprietários privados possuem áreas florestais inferiores a 5 hectares e apenas 4% tem áreas superiores a 100 hectares;
- O rendimento proveniente da floresta representou para 76% dos proprietários menos de 10% do rendimento do proprietário nos últimos dez anos.

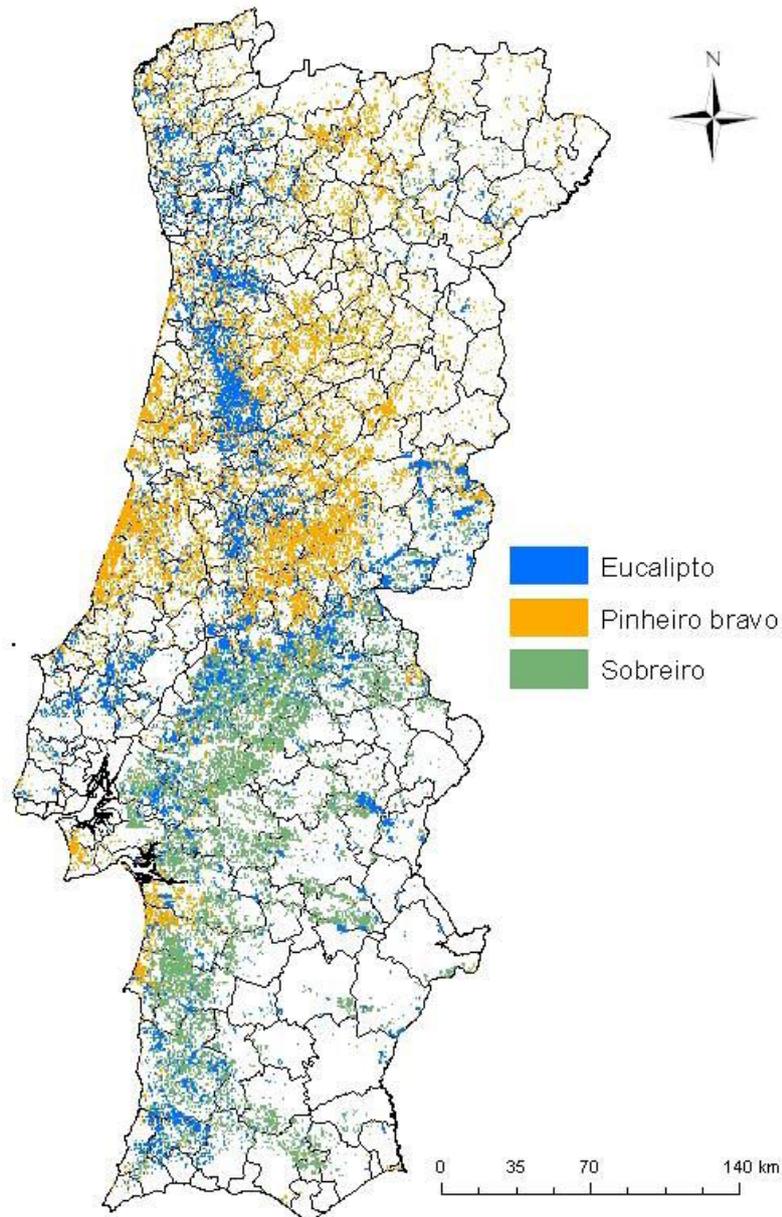


Figura 1.2: Distribuição do eucalipto, pinheiro bravo e sobreiro em Portugal continental (Netto, 2008)

Estas conclusões podem fazer incidir alguma luz sobre o potencial da biomassa em território nacional. Portugal é dos países europeus com maior percentagem de área florestal e o sétimo com a maior área absoluta na UE 15. No entanto, esta disponibilidade pode ficar desaproveitada pelo facto dos proprietários privados possuírem áreas de reduzidas dimensões e fragmentadas.

Outro factor que pode conduzir ao desinteresse pela floresta relaciona-se com a ocorrência de incêndios florestais de grandes dimensões. O clima mediterrânico, com

verões quentes e secos, favorece a ocorrência de incêndios. Outras razões existem para que os incêndios sejam uma realidade constante no período de Verão: o abandono rural, a acumulação de combustível, a negligência ou o fogo posto. O elevado risco de incêndio afasta ainda mais os proprietários da actividade florestal e conduz ao subaproveitamento dos recursos florestais.

1.5. Propriedades físicas da biomassa sólida

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor libertada pela combustão de uma unidade de massa da madeira. No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilo calorias por quilograma (Quirino *et al.*, 2005).

O poder calorífico pode ser dividido em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efectua a volume constante, no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado. O poder calorífico inferior é a energia efectivamente disponível por unidade de massa de combustível, após a dedução das perdas com a evaporação da água.

A percentagem de humidade influencia significativamente a qualidade da combustão e o poder calorífico da biomassa. Por exemplo, o poder calorífico da madeira duplica se for reduzido o teor em água da madeira de 50% (madeira em pé) para 20% (madeira depois de 2 anos de secagem ao ar) (Christian Staiss *et al.*, 2001). Em comparação com o petróleo, que tem um poder calorífico de 42 MJ/kg, a madeira seca ao ar somente atinge um terço deste poder calorífico (14 MJ/kg). Para igual percentagem de humidade, os poderes caloríficos dos diferentes biocombustíveis sólidos não se distinguem entre si de forma significativa. Os poderes caloríficos livres de água oscilam entre 16,9 MJ/kg (feno) e 18,7 MJ/kg (madeira de conífera). É de referenciar que 1 kWh corresponde a 3,6 MJ (CISEPI, 2001).

Na Figura 1.3 estão representados alguns valores de poder calorífico para várias espécies florestais em função do teor de humidade.

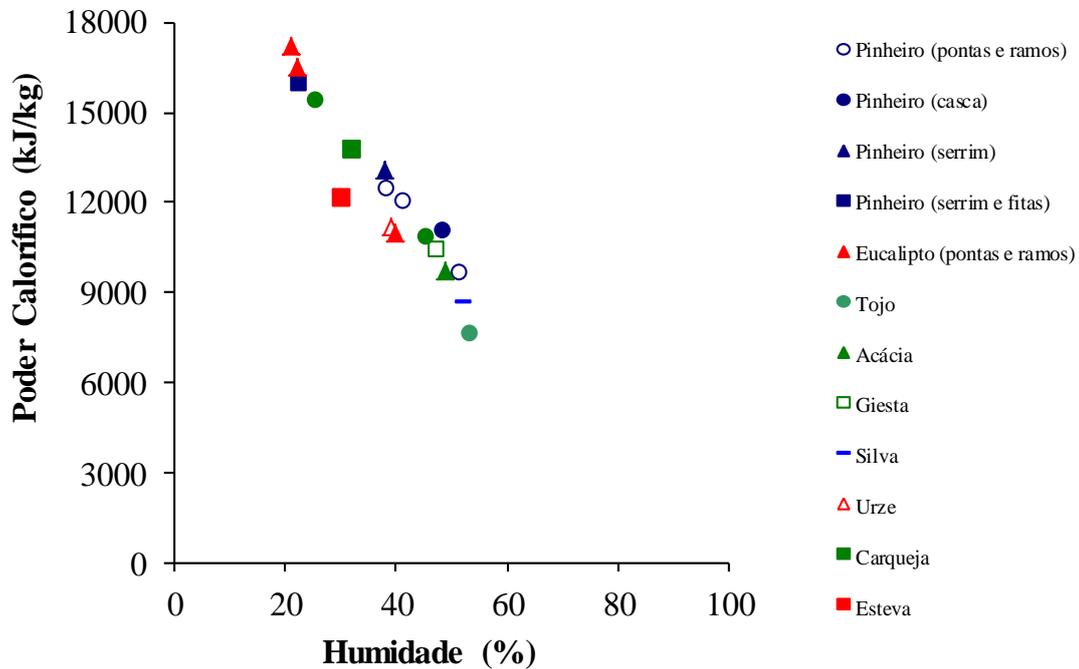


Figura 1.3: Valores de poder calorífico em função do teor de humidade para diversos tipos de biomassa (Christian Staiss *et al.*, 2001)

1.6. Combustão da biomassa

As propriedades físicas dos combustíveis derivados de biomassa apresentam uma grande variabilidade, dependendo principalmente da qualidade da matéria-prima que lhes dá origem, bem como dos métodos de preparação e pré-tratamento do combustível (granulometria e forma do material).

Apesar da elevada variabilidade apresentada nas propriedades da biomassa, estas diferem consideravelmente do carvão em parâmetros como a sua composição química (orgânica e inorgânica), no seu conteúdo energético e nas suas características físicas. De um modo geral, a biomassa caracteriza-se por apresentar maiores teores em humidade e cinzas, menor poder calorífico, menos carbono e mais oxigénio e azoto, maiores teores em sílica e potássio, menos alumínio e ferro, menor densidade, menores teores em

enxofre. Em alguns combustíveis derivados de biomassa, verificam-se ainda teores em cloro superiores aos encontrados no carvão (Araújo , 2008).

Na Tabela 1.2 apresentam-se valores médios relativos a diversas propriedades físicas e químicas encontradas em combustíveis de biomassa e carvão.

Tabela 1.2: Propriedades físicas e químicas típicas de biomassa e carvão (Araújo , 2008)

Propriedade	Biomassa	Carvão
Massa volúmica combustível (kg/m ³)	~500	~1300
C (%(m/m) bs – combustível)	42 - 54	65 - 85
O (%(m/m) bs – combustível)	35 - 45	2 - 15
S (%(m/m) bs – combustível)	Max 0,5	0,5 -7,5
SiO ₂ (%(m/m) bs cinzas)	23 - 49	40 - 60
K ₂ O (%(m/m) bs cinzas)	4 - 48	2 - 6
Al ₂ O ₃ (%(m/m) bs cinzas)	2,4 - 9,5	15 - 25
Fe ₂ O ₃ (%(m/m) bs cinzas)	1,5 - 8,5	8 - 18
Temperatura de Ignição (K)	418 - 426	490 - 595
Poder calorífico (MJ/kg)	14 - 21	23 - 28

Apesar da heterogeneidade associada aos diferentes tipos de biomassa, da sua composição típica depreende-se, numa primeira análise, que a utilização de biomassa com elevados teores em humidade e/ou cinzas, numa caldeira, pode conduzir a problemas relacionados com a ignição do combustível e a eficiência da combustão. As características das cinzas de biomassa (ponto de fusão, percentagem de potássio) podem beneficiar a formação de depósitos e incrustações no interior da câmara de combustão. A biomassa apresenta um menor poder calorífico devido a maiores teores em humidade e oxigénio, que podem conduzir a problemas relacionados com a estabilização da chama. O cloro presente em alguns tipos de biomassa pode originar alguns problemas de corrosão (Araújo , 2008).

1.7. Reacções durante a combustão de biomassa

A combustão de biomassa é um processo que engloba um conjunto de operações e reacções denominadas como:

1. Secagem;

2. Pirólise;
3. Gaseificação;
4. Combustão (resíduo carbonoso e produtos gasosos).

O primeiro fenómeno verificado ao longo da combustão de biomassa é a secagem, na qual a biomassa começa por perder o teor de humidade através da energia térmica. Após a secagem, verifica-se a libertação de monóxido de carbono e de gases voláteis. Numa primeira fase verifica-se a libertação de metano e de outros hidrocarbonetos leves, e com o aumento da temperatura verifica-se a libertação de alcatrões. Estes gases podem representar cerca de 70% do poder calorífico associado à biomassa. O processo de combustão é finalizado com a oxidação do resíduo carbonoso e com a retenção de cinzas. Na figura 1.4 apresentamos um termograma, obtido por TGA (Thermo Gravimetric Analysis), com a indicação dos principais fenómenos verificados ao longo do processo combustão (Araújo , 2008).

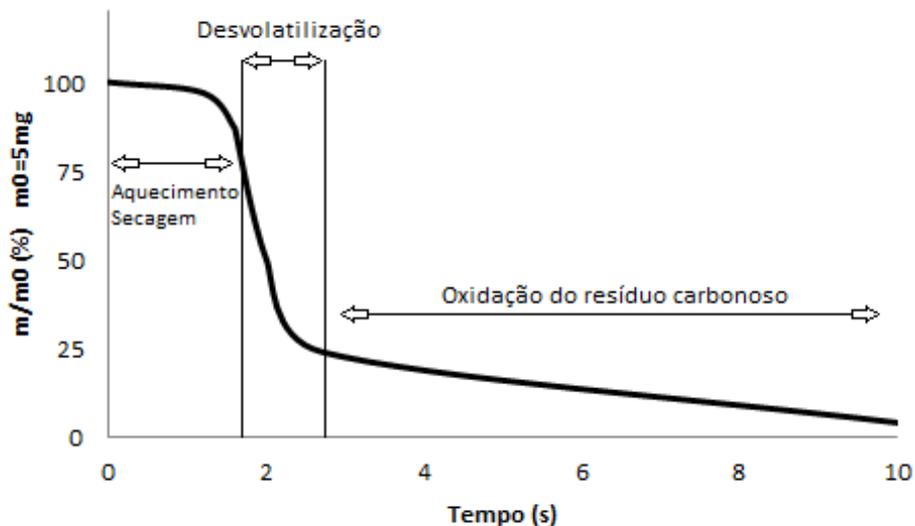


Figura 1.4: Perda de massa (%) ao longo do tempo (s) durante a combustão de madeira (Araújo , 2008)

Em complemento à Figura 1.4, é apresentado na Tabela 1.3 os principais fenómenos existentes durante a combustão de Biomassa.

Tabela 1.3: Principais fenómenos da combustão da Biomassa (Araújo , 2008)

Secagem	Pirólise	Gasificação	Combustão
Evaporação da humidade presente no combustível por recurso à energia libertada no processo de combustão	Degradação térmica (desvolatilização) do combustível na ausência de um agente oxidante externo	Degradação térmica (desvolatilização) do combustível na ausência de um agente oxidante externo em quantidade insuficiente para que se dê uma oxidação completa	Oxidação completa do combustível
Diminuição de temperatura na câmara de combustão	Libertação de compostos voláteis	Oxidação do resíduo carbonoso com CO ₂ ou H ₂ O	Oxidação dos produtos gasosos resultantes da pirólise e gasificação
	Produção de alcatrão, resíduo carbonoso e gases de baixo peso molecular	A gasificação pode ocorrer na presença de ar, oxigénio, vapor ou CO ₂ enquanto agentes oxidantes	Queima das partículas de resíduo carbonoso formadas durante a pirólise e gasificação
	Formação de CO e CO ₂ em combustíveis ricos em oxigénio		

1.8. Objectivos

A caracterização das propriedades calorimétricas e de transporte de água na madeira, é um tema de investigação que apresenta um grande impacto no aproveitamento da biomassa agro-florestal como fonte primária de energia, bem como, no tratamento energeticamente eficiente de produtos da indústria da madeira. Com a realização deste trabalho pretende-se atingir os seguintes objectivos:

- i. Verificar a influência do teor de água no poder calorífico da biomassa agro-florestal;
- ii. Realizar a distinção do PCI entre o lenho inicial e o lenho final;
- iii. Perceber a influência da temperatura de acondicionamento da amostra, no valor final de PCI;

- iv. Identificar modelos matemáticos de previsão do PCI;
- v. Determinar um modelo de cálculo do PCI e efectuar uma comparação com os modelos teóricos, com o intuito de identificar um modelo genérico de cálculo de PCI para a espécie *Pinus pinaster*.

1.9. Conteúdo da Tese

A presente dissertação é composta por 6 capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução, e o ultimo onde se apresentam as principais conclusões da dissertação.

No capítulo 1 é apresentado uma revisão bibliográfica relacionada com os aspectos gerais da madeira, e a consequente biomassa aproveitada para produção de energia. Para além da apresentação sumária da situação florestal do País, são apresentadas as principais propriedades físicas da biomassa, bem como as principais etapas da combustão.

Ao longo do capítulo 2, é realizada uma breve revisão acerca da estrutura macroscópica e microscópica da madeira. Seguidamente, apresentam-se as principais propriedades físicas da madeira com o intuito de perceber a sua importância na variação do PCI. Por último realiza-se uma breve exposição sobre a influência directa do teor de humidade no valor final do PCI.

No decorrer do capítulo 3, é apresentado todo o trabalho experimental realizado na dissertação de mestrado, desde a obtenção da estilha, até à determinação do valor de PCS.

O capítulo 4 expõe os resultados obtidos experimentalmente, tratados e analisados com o auxílio de gráficos.

No capítulo 5 é apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos de previsão do poder calorífico, em função da composição química, do teor de humidade, e por último em função do teor de humidade e da composição química.

Posteriormente, será realizada uma correlação entre os valores obtidos pelos modelos matemáticos e os valores experimentais.

Ao longo do capítulo 6 é determinado uma expressão genérica para o cálculo do PCI, através de um método matemático recorrente ao interpolador de diferenças divididas de Newton, e da modelação gráfica. Finalmente, será realizada uma comparação entre ambos os métodos e o modelo bibliográfico que melhores resultados apresente.

O capítulo 7 reúne as principais conclusões obtidas no decorrer da dissertação.

Capítulo 2

Estrutura e Higroscopicidade da Madeira

Pretende-se neste capítulo efectuar uma revisão bibliográfica sucinta da estrutura e da higroscopicidade da madeira. Serão ainda apresentadas algumas propriedades físicas da madeira com o intuito de perceber a sua influência directa no valor final do PCI.

2. Estrutura da Madeira

As espécies florestais podem ser classificadas em dois grupos: resinosas (ou gimnospérmicas) e folhosas (ou angiospérmicas). Esta divisão baseia-se nas diferenças da estrutura anatómica existente entre as espécies pertencentes aos dois grupos.

A madeira das espécies resinosas é constituída por apenas dois tipos de células: os traqueídeos e os parênquimas. Observando a Figura 2.1, pode identificar-se claramente estes dois tipos de células.

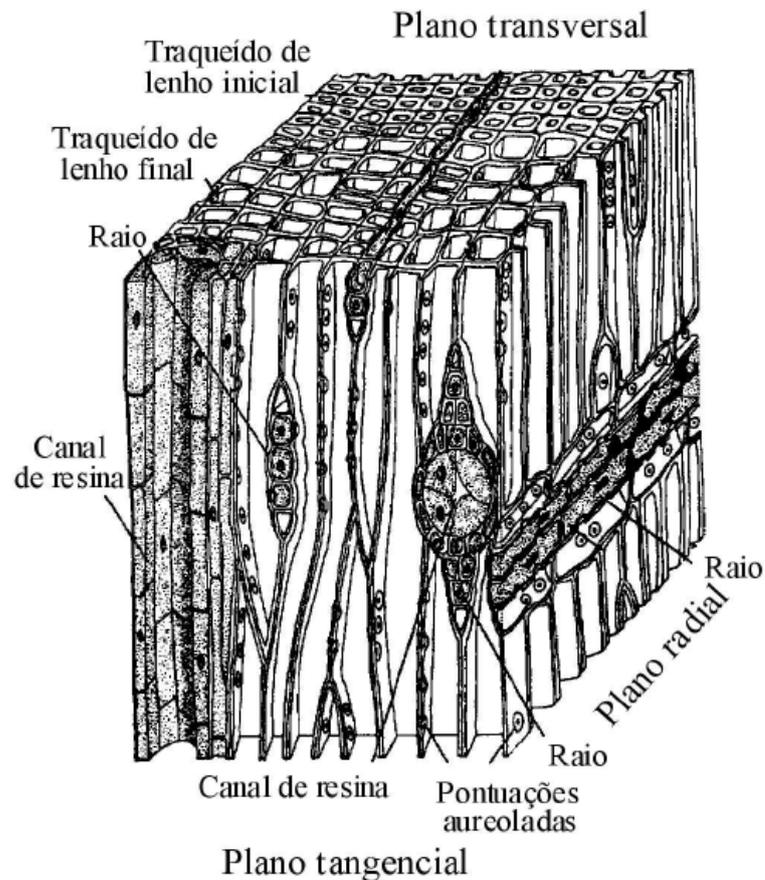


Figura 2.1: Esquema tridimensional da madeira das espécies resinosas (Xavier, 2003)

Os traqueídeos são células bastante compridas, dispostas num sistema vertical e com funções de condução e suporte, representando normalmente mais de 95% de volume total do tronco. As parênquimas são células com funções de armazenamento e transporte, que se dispõem num sistema horizontal (Xavier, 2003).

A madeira das espécies folhosas, apresentada na Figura 2.2, exibe uma maior variabilidade estrutural e uma maior complexidade anatómica, sendo constituída por fibras, vasos e parênquimas axiais, dispostos verticalmente, e por parênquimas, dispostos horizontalmente.

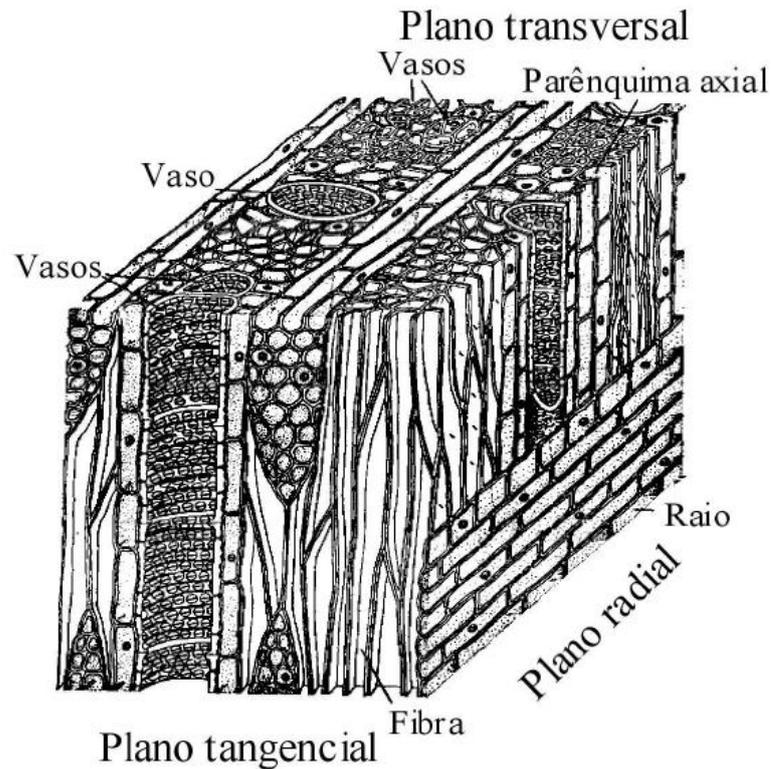


Figura 2.2: Esquema tridimensional da madeira das espécies folhosas (Xavier,2003)

As fibras têm uma função específica de suporte com um comprimento muito inferior aos traqueídeos e representam entre 15% a 60% do volume da madeira. Os vasos que têm a função de transporte, possuem um comprimento reduzido e um diâmetro superior a qualquer outro tipo de células, ocupando entre 20% a 60% do volume da madeira. O parênquima axial tem a função de armazenamento e constitui até 15% do volume da madeira. Por último, os raios têm a função de transporte e armazenamento, representando entre 5% a 30% do volume da madeira. De acordo com a forma como os vasos estão dispostos nos anéis de crescimento, as espécies folhosas são classificadas como sendo de porosidade em anel ou de porosidade difusa. Deste modo, na Figura 2.3 é possível verificar que, numa madeira folhosa de porosidade em anel, os vasos que se formam no lenho inicial ou de primavera são maiores do que os que se formam no lenho final de Outono. Numa madeira de porosidade difusa, os diâmetros dos vasos são praticamente iguais entre si dispondo-se uniformemente ao longo de todo o anel de crescimento (Xavier, 2003).

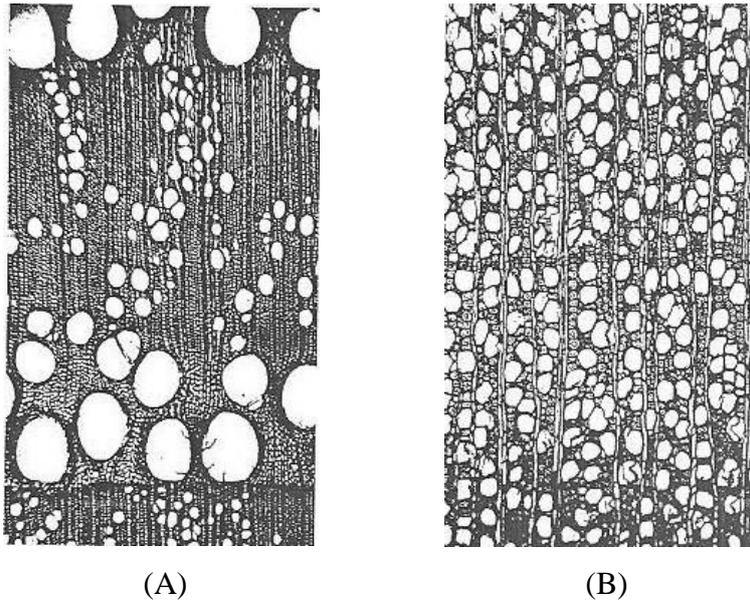


Figura 2.3: Esquema da madeira da espécie folhosa (Xavier, 2003)

Legenda:

Esquema das espécies folhosas:

- (A): Porosidade em anel;
- (B): Porosidade difusa;

2.1. Estrutura macroscópica da madeira resinosa

Na Figura 2.4 são expostas as superfícies do tronco duma árvore resinosa, sendo possível distinguir três planos:

- A secção transversal, resultante do corte transversal do tronco;
- A secção radial, obtida num corte longitudinal ao longo do plano dos raios, desde o centro da árvore (medula) até a casca exterior;
- A secção tangencial, perpendicular às duas anteriores;

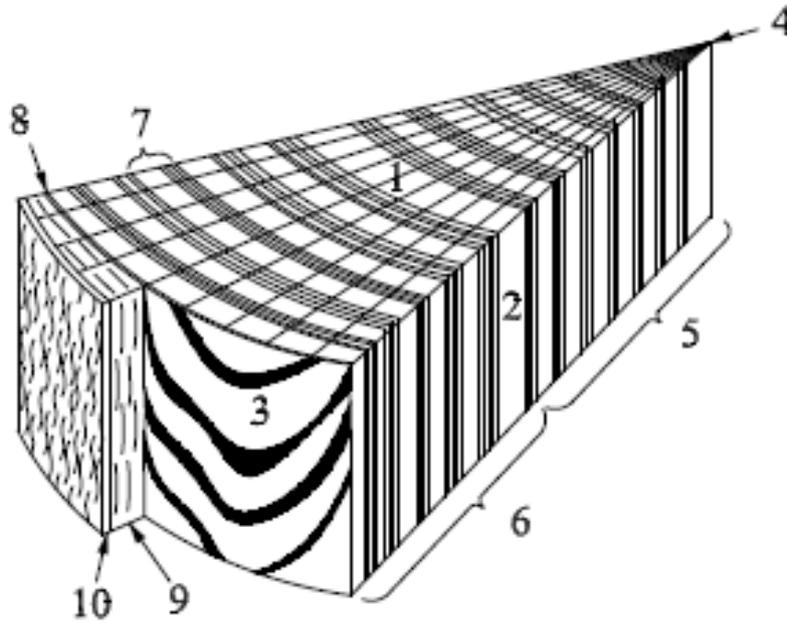


Figura 2.4: Características gerais de um tronco duma resinosa (Xavier, 2003): 1. Seção transversal; 2. Seção Radial; 3. Seção tangencial; 4. Medula; 5. Cerne; 6. Borne; 7. Anel de crescimento; 8. Câmbio; 9. Casca interior; 10. Casca exterior.

O tronco de uma árvore viva desempenha três tipos de funções: Condução, suporte e armazenamento. As células que desempenham o papel de armazenamento, estão estas dispostas ao longo da secção transversal do tronco em duas zonas possivelmente de coloração diferenciada, uma central e outra periférica, conhecidas por cerne e borne, respectivamente.

Na Figura 2.5 está representada a secção transversal do tronco duma árvore resinosa, nomeadamente daquelas que crescem em regiões com acentuadas alterações climáticas anuais, onde são visíveis zonas alternadas de cor escura e cor clara, aproximadamente concêntricas, correspondendo a acréscimos sucessivos de lenho ao longo do diâmetro. Cada par de zonas escura e clara corresponde ao crescimento anual da árvore, designando-se por anel de crescimento. As zonas mais claras correspondem ao lenho formado durante a primeira fase do período vegetativo (lenho inicial), em que as células são caracterizadas por apresentarem paredes finas e lúmens grandes.

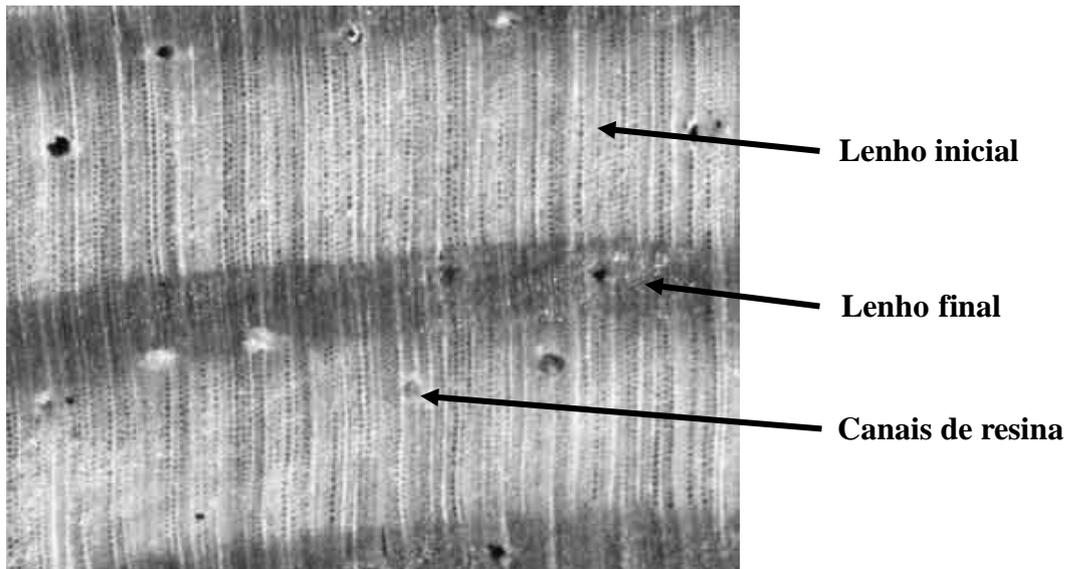


Figura 2.5: Disposição do lenho inicial, lenho final e canais de resina num anel de crescimento (Xavier, 2003)

As zonas mais escuras correspondem ao lenho produzido na segunda fase do período vegetativo (lenho final), com células de paredes espessas e lúmens reduzidos.

2.2. Estrutura microscópica

A madeira é um material heterogéneo formado pela acumulação sucessiva de células, que se dispõem no interior do tronco num sistema vertical (traqueídeos) e num sistema horizontal (raios). De um modo geral, estas células são muito finas e ocas (lúmen), com uma relação comprimento/largura muito elevada e com perfurações para poderem comunicar entre si. Na Figura 2.6 ilustra-se a forma dos traqueídeos longitudinais pertencentes ao lenho inicial e final.

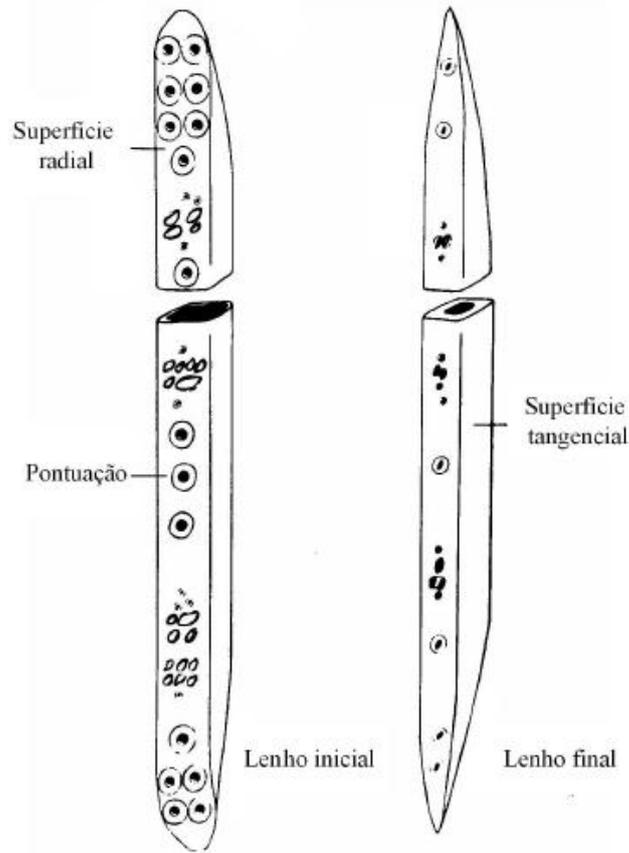


Figura 2.6: Esquema dos traqueídeos longitudinais pertencentes ao lenho (Xavier, 2003)

Os traqueídeos longitudinais do lenho inicial, comparativamente aos do lenho final, são maiores em diâmetro, com paredes mais finas e lúmens de maior dimensão. A parede de ambos é caracterizada pela presença de perfurações que permitem o fluxo de fluídos entre as células. Os raios são consideravelmente mais pequenos do que os traqueídeos longitudinais, constituídos por paredes finas que contêm perturbações simples com membranas não perfuradas.

Uma característica da madeira resinosa é possuírem células epiteliais que se agregam formando os chamados canais de resina. Estes canais são tubulares com diâmetros geralmente superiores aos dos raios, dispostos num sistema longitudinal e transversal. Os canais resinosos estão situados preferencialmente nas regiões de transição entre o lenho final e o lenho inicial.

2.3. Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas da madeira são bastante importantes pois influenciam directamente o comportamento dimensional, tanto no momento de produção de componentes como em toda a sua vida útil, como na durabilidade a longo prazo. Caracterizam-se por não necessitarem de que se actue química e fisicamente em toda a estrutura da madeira para efectuar uma avaliação qualitativa e quantitativa. (Santos, 2007)

2.3.1. Teor de humidade

O teor de humidade é um factor que influencia directamente quase todas as propriedades físicas da madeira, tanto a nível energético como a nível mecânico. A água encontra-se no interior da madeira em duas formas básicas, água de capilaridade (água livre), localizada no lúmen das células, em estado líquido, e água de adesão (higroscópica), localizada no interior das paredes celulares, em estado de vapor.

Durante o processo de secagem da madeira, a primeira água a ser removida é a água livre que se encontra no lúmen da madeira, sendo transportada para o exterior, de célula em célula, até atingir a superfície externa da madeira. A água de adesão encontra-se no interior da parede celular em estado de vapor, sendo esta água bastante difícil de ser removida, tornando o processo lento e com maior necessidade energética (Esteves, 2009).

Quando falamos em teor de humidade no interior da madeira é importante perceber bem o significado do ponto de saturação das fibras (PSF), pois é uma referência importante nas relações da água com a madeira, uma vez que as variações de dimensão da madeira só se manifestam abaixo deste (Carvalho, 2009). O ponto de saturação das fibras (PSF) existe quando toda a água livre ou de capilaridade for retirada da madeira, ficando apenas a água de adesão, atingindo a madeira o teor de humidade de saturação do ar, ou atingindo o ponto de saturação das fibras (PSF). Fisicamente, pode ser explicado pela situação em que as paredes celulares estão saturadas de água,

sem existir água no lúmen das células. Segundo Martins (2009), o ponto de saturação das fibras normalmente aproxima-se de um teor de humidade de 30 %.

Quando uma peça de madeira previamente seca é exposta ao meio ambiente, esta tende a absorver a água que está dispersa no ar em forma de vapor. Como tal, a água absorvida irá corresponder a água higroscópica ou de adesão. Quando a madeira absorve água do meio ambiente e atinge um teor de humidade final, valor este que é função da espécie e das condições do meio ambiente, diz-se que a madeira atingiu o teor de humidade de equilíbrio com o ambiente (TUE). Se a madeira ganha humidade, as paredes das células vão inchar até ficarem saturadas, atingindo o ponto de saturação das fibras (FSP). Em contraste, a perda de humidade (abaixo do FSP), devido à difusão e evaporação, resulta na retracção da madeira (Esteves, 2009).

A remoção da água abaixo do PSF faz-se com maior dificuldade, sendo necessárias maiores quantidades de energia para quebrar as ligações existentes entre as moléculas de água (adsorção polimolecular), ou entre elas e os grupos hidróxilos (adsorção monomolecular).

2.3.2. Higroscopicidade da Madeira

A higroscopicidade é uma propriedade característica dos materiais que efectuem trocas de humidade com o ar envolvente, absorvendo ou libertando água para a atmosfera, até atingir o equilíbrio.

A madeira é caracterizada como sendo higroscópica. Para as mesmas condições de exposição, a humidade de equilíbrio da madeira varia com a espécie, com a localização da peça de madeira no tronco (cerne ou borne), com a proporção dos constituintes da parede celular e com o teor de extractáveis (Carvalho, 2009). A Figura 2.7 representa a humidade de equilíbrio em função da humidade relativa com o aspecto característico sigmoidal.

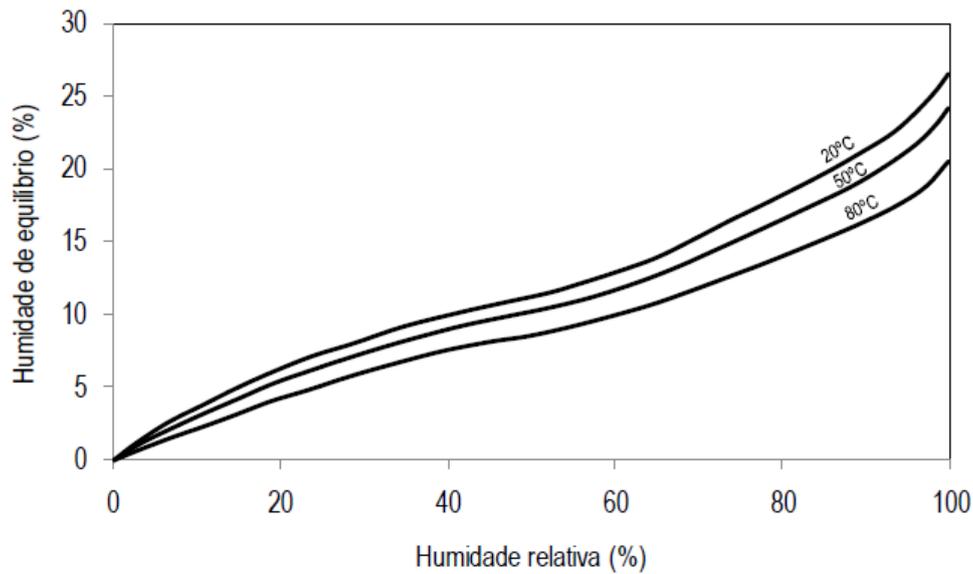


Figura 2.7: Isotérmicas higroscópicas mostrando a relação entre a humidade relativa e a humidade de equilíbrio a diferentes temperaturas (Carvalho, 2009).

As funções ilustradas na Figura 2.7 possuem esta característica devido às forças de ligação da água com a madeira se tornarem mais fortes à medida que o teor de humidade da madeira diminui.

2.3.3. Massa Volúmica

A massa volúmica da madeira é considerada normalmente em termos de um volume aparente, em que não é deduzido o volume compreendido pelos poros. Assim, é um parâmetro que varia em função do teor em água da madeira, o qual influência não só o seu peso, como também, o seu volume (Junior, 2006). Assim sendo, a massa volúmica é definida pela seguinte Expressão:

$$D_h = \frac{P_h}{V_h} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2.1)$$

em que P_h é o peso do provete de madeira para o teor em água h e V_h é o volume do provete para o teor em água h .

2.3.4. Composição Química

As árvores são seres vivos que, tal como todas as plantas, produzem açúcares para que sejam incorporados na sua estrutura celular. Esta produção de açúcar (hidratos de carbono), dá-se através da reacção do dióxido de carbono, da água e sais minerais existentes no solo. Para que exista este processo é necessário que a energia solar interaja com os pigmentos nas folhas das árvores, ocorrendo assim a fotossíntese, na qual resultam os hidratos de carbono, a água e o oxigénio.

Os hidratos de carbono produzidos são moléculas de glucose, sendo este um açúcar simples, que constitui a base de formação de outras substâncias. É muito importante a forma como as moléculas de glucose se dispõem: quando estas se encontram reunidas no mesmo plano dispostas sequencialmente na mesma posição formam o amido. O amido é uma substância facilmente sintetizável, fazendo parte dos produtos de armazenamento da planta. Quando as moléculas de glucose se encontram invertidas de uma forma alternada ao longo da cadeia, forma-se a celulose (Martins, 2009).

A celulose está presente entre 40 a 50% da constituição da madeira, fortalecendo a estrutura ao ser responsável pela rigidez das paredes celulares e pela higroscopicidade da madeira (Esteves, 2009).

Durante o processo de fotossíntese forma-se outro dos componentes principais da madeira, a hemicelulose. As cadeias das moléculas de hemicelulose são mais curtas que as de celulose, possuem menor massa molar e, na maioria das vezes são ramificadas. A hemicelulose corresponde a 20 a 30 % da constituição das resinosas e, 25 a 40 % das folhosas, sendo a principal responsável pela elasticidade, executando a função de ligante da celulose (Martins, 2009).

Durante o processo de fotossíntese, tanto nas folhosas como nas resinosas, é formada uma molécula muito complexa designada de lenhina. A lenhina é uma componente muito estável e importante para a durabilidade da madeira, é impermeável, insolúvel e assegura a coesão transversal das fibras, assumindo-se como ligante. As folhosas, de uma forma geral, possuem menos lenhina (20 a 25 %) do que as resinosas

(25 a 30 %) (Martins, 2009). A lenhina é um polímero termoplástico que quando aquecido acima da sua temperatura vítrea, assemelha-se à borracha (Esteves, 2009).

A celulose, a hemicelulose e a lenhina corresponde aproximadamente a 97-99% da constituição da madeira em zonas temperadas e 90% em zonas tropicais, sendo a restante fatia correspondente a substâncias extractivas e matérias minerais.

Tillman (1978), citado por Quirino *et al.* (2005), considera que a estrutura física não é um importante parâmetro na determinação do valor energético das madeiras, mas a composição química é de importância crítica.

Ao longo do trabalho de Quirino *et al.* (2005), é ainda relatado que a variação na composição química, dimensões, forma e arranjo dos elementos anatómicos e a ocorrência de extractivos, acarretam uma diferenciação nas características energéticas de várias madeiras.

O poder calorífico superior da madeira, além da humidade, é muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lenhina e os extractivos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc). Desta maneira, as coníferas que apresentam um conteúdo de resinas e lenhina maior que as latifoliadas, ostentam conseqüentemente um maior poder calorífico superior, que varia também conforme a parte da árvore que esteja em combustão (casca, nós, ramos, madeira do toco). Assim sendo, o poder calorífico é mais alto quanto maior é o teor de lenhina e de extractivos, porque os mesmos contêm menos oxigénio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose) (Quirino *et al.*, 2005).

Lima *et al.* (2008) refere que geralmente, no momento do corte da árvore, a humidade está acima de 60 %. Porém, devido à sua natureza higroscópica, decorrente de sua composição química (polímeros de celulose, hemicelulose e lenhina) a madeira é capaz de absorver ou liberar água para o meio ambiente.

As substâncias extractivas são substâncias extractáveis pela água, ou por dissolventes neutros orgânicos, tais como o álcool, o benzol, o éter, a acetona, entre outros.

Como substâncias extractivas podem-se encontrar os taninos, as matérias corantes, os óleos essenciais, as ceras, as gorduras, as resinas, as saponinas, os hidrocarbonetos solúveis, os açúcares, entre outros.

Estas substâncias não se encontram todas ao mesmo tempo na mesma espécie de madeira, algumas delas são características de determinadas espécies. As substâncias extractivas localizam-se essencialmente no cerne, sendo a causa principal da cor mais escura, e aumentam a resistência do cerne aos ataques biológicos. Os extractivos podem ter uma grande influência nas propriedades da madeira, nomeadamente na durabilidade, na dureza, no cheiro, na cor, na abrasão, na colagem, ou até mesmo na afinidade para impregnação de tintas e vernizes. A constituição química, através da presença de substâncias extractivas específicas leva a que certas espécies sejam resistentes ou susceptíveis aos ataques biológicos (Martins, 2009).

Na tabela 2.1 é apresentado sucintamente a composição química da madeira para as espécies resinosas e folhosas.

Tabela 2.1: Composição química de duas espécies de madeira (Santos, 2007)

	Resinosas	Folhosas
Celulose		40 - 50%
Hemicelulose	20 - 30%	25 - 40%
Lenhina	25 - 30%	20 - 25%
Substâncias extractivas		1 - 3%

2.4. Influência do teor de humidade no poder calorífico

Ao longo do trabalho de Quirino *et al.* (2005), é citado que é importante que o teor de humidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manuseamento e o custo de transporte, agregado ao valor do combustível.

O teor de humidade máximo que a madeira pode ter ao ser queimada no forno está compreendido entre 65% a 70%, em base húmida. Devido há existência deste valor, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, visto que a humidade da madeira evapora e absorve energia da combustão. (Quirino *et al.*, 2005) Desta forma, a madeira com teor de humidade acima deste limite, tem necessidade de ser previamente seca para melhorar a combustão, aumentar o rendimento do forno e evitar corrosão no interior do forno.

Quando a madeira é utilizada para geração de energia, a humidade influencia negativamente a quantidade de calor libertada durante a queima, diminuindo a eficiência energética. Durante a queima da madeira, parte da energia liberada é utilizada para evaporar a água, diminuindo o poder calorífico superior. (Lima, Abdala, & Wenzel, 2008)

No decorrer do trabalho de Vale *et al.* (2000), é mencionado que quanto menor é o teor de humidade da madeira, maior será a produção de calor por unidade de massa. É referido ainda que, para a combustão, a madeira não pode ter teor de humidade superior a 25%, pois os valores superiores reduzem o calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape.

O teor de humidade da madeira pode ser calculado através do peso inicial da amostra (P_i) e do peso da amostra após secagem na estufa (P_f). Deste modo, o teor de humidade, em percentagem, é dado pela expressão:

$$T_u = \frac{(P_i - P_f)}{P_f} \times 100 \quad (2.2)$$

Capítulo 3

Trabalho Experimental

No presente capítulo pretende-se descrever o trabalho experimental preliminar que foi efectuado com vista à avaliação do poder calorífico da madeira *Pinus pinaster* com diferentes teores de humidades. Deste modo, serão apresentadas todas as etapas do trabalho, todos os equipamentos utilizados ao longo do trabalho experimental, bem como as humidades a que as amostras foram sujeitas.

3. Trabalho Experimental

Ao longo deste Capítulo são apresentados os equipamentos utilizados na determinação experimental dos parâmetros previamente indicados. São ainda apresentados os procedimentos usados na manipulação das amostras no decorrer do trabalho experimental.

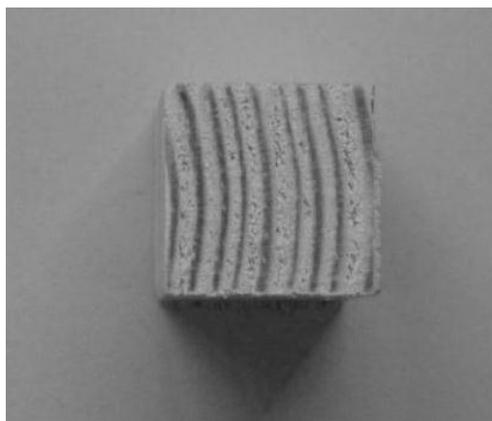
3.1. Obtenção de serrim dos lenhos

Com o intuito de analisar o poder calorífico ao nível do lenho inicial e final de amostras de madeira de *Pinus pinaster*, foi necessário obter aproximadamente 180 gramas de estilha de lenho inicial, bem como 180 gramas de estilha de lenho final. Esta estilha será utilizada posteriormente em ensaios calorimétricos, possibilitando a determinação do poder calorífico. De seguida é apresentado o procedimento utilizado para a realização desta tarefa.

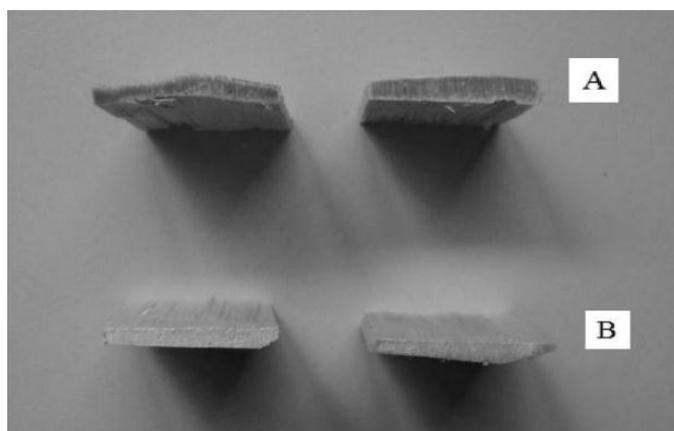
1. Cortaram-se cubos de madeira de forma a proporcionar, de forma simples, o corte dos lenhos (Figura 3.1a);
2. Com um *X-acto* foram extraídos os lenhos inicial e final, colocando-os em recipientes separados (Figura 3.1b);
3. De seguida pesaram-se todas as amostras numa balança, tendo sido produzidas 200 gramas de cada tipo de lenho (inicial e final), de forma a precaver eventuais perdas de material no moinho;
4. Finalmente, procedeu-se à trituração das amostras de lenho inicial e final, num moinho de madeira (Figura 3.1c), com um filtro de rede de 2 mm. Este tamanho foi escolhido tendo em conta as instruções do calorímetro que indicam a granulometria adequada para os ensaios.

3.2. Controlo higrotérmico das amostras

Antes de se dar início ao programa experimental, a estilha, foi sujeita à secagem prévia. Para o efeito foi utilizada uma estufa de vácuo a 50°C (Figura 3.2b), juntamente com sílica gel, de modo a garantir uma eficaz secagem da madeira. O tempo de secagem foi determinado por pesagens sucessivas, até à estabilização do peso do serrim.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1: Etapas de preparação das amostras: (a) cubo de madeira; (b) lenho final (A) e lenho inicial (B); (c) moinho.



(a)



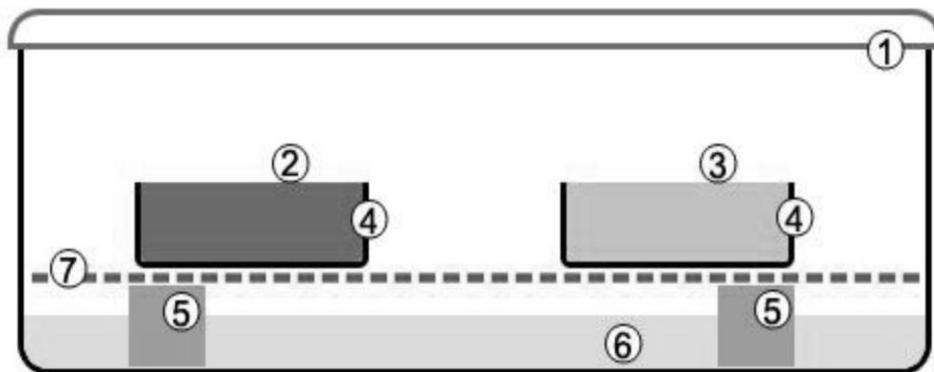
(b)

Figura 3.2: Secagem prévia das amostras: (a) recipiente com as amostras; (b) estufa de vácuo.

Após o processo de secagem, a estilha foi sujeita a diferentes condições de humidade e temperatura, dando-se início ao processo de absorção. A estilha seca foi retirada da estufa de vácuo e introduzida em caixas herméticas (Figura 3.3), onde através de uma solução salina saturada, se garantia uma determinada humidade relativa. Na Tabela 3.1 são apresentados os sais utilizados na criação das atmosferas, bem como, o valor da humidade relativa correspondente.



(a)



(b)

Figura 3.3: Ensaio de absorção: (a) Recipientes com as amostras; (b) Esquema de montagem dos vários elementos na caixa hermética (1 – Caixa hermética; 2 – Estilha de lenho final; 3 – Estilha de lenho inicial; 4 – Recipiente plástico; 5 – Apoios de suporte à rede; 6 – Solução aquosa; 7 – Rede de plástico).

Além das diferentes humidades relativas, a estilha foi também sujeita a quatro temperaturas diferentes para cada humidade (35°C, 50°C, 65°C e 80°C).

Tabela 3.1: Humidades relativas (ASTM E104-02, 2002)

Designação	Sais utilizados	Temperatura (°C)	Humidade (%)
HR1	LiCl	35	11,3 ± 0,3
		45	11,2 ± 0,3
		55	11,0 ± 0,3
		65	10,9 ± 0,3
HR2	MgCl ₂	35	32,1 ± 0,2
		45	31,1 ± 0,1
		55	29,9 ± 0,2
		65	28,5 ± 0,3
HR3	NaBr	35	54,6 ± 0,4
		45	52,0 ± 0,5
		55	50,2 ± 0,7
		65	49,5 ± 1,0
HR4	KI	35	67,0 ± 0,3
		45	65,3 ± 0,3
		55	63,8 ± 0,3
		65	62,5 ± 0,4
HR5	NaCl	35	74,9 ± 0,2
		45	74,5 ± 0,2
		55	74,5 ± 0,9
		65	74,4 ± 0,9
HR6	KCl	35	83,0 ± 0,3
		45	81,7 ± 0,3
		55	80,7 ± 0,4
		65	79,9 ± 0,5

3.3. Determinação do PCS da estilha

Para efectuar a determinação do poder calorífico, utilizou-se um calorímetro de bomba “Parr 6300” (Figura 3.4), sendo realizado o seguinte procedimento experimental:



Figura 3.4: Calorímetro “PARR 6300”.

1. Retirar da estufa o recipiente com a estilha e realizar um período de estágio à temperatura ambiente de aproximadamente 5 minutos;
2. Pesar cerca de 0,6 gramas de amostra com a ajuda de uma balança (Figura 3.5a). A quantidade de estilha é a necessária para garantir a ignição da amostra.
3. Colocação da amostra no porta-amostras do calorímetro (Figura 3.5b).



(a)



(b)

Figura 3.5: (a) Pesagem da amostra e (b) porta-amostra do calorímetro.

A duração de cada ensaio no calorímetro é de cerca de 15 minutos. É extremamente importante que no intervalo de cada ensaio se efectue a limpeza do calorímetro.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

No presente Capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente para os ensaios de poder calorífico em função do teor de humidade relativa.

4. Introdução

Para cada combinação de humidade relativa e temperatura foram realizados entre 5 a 6 medições de PCS. No Anexo 1 estão reunidos todos os resultados referentes a estas medições. Alguns valores foram excluídos do cálculo do valor médio de PCS, visto serem valores que não se enquadram no valor médio final. Este erro pode ter derivado de uma pesagem incorrecta da estilha, ou de uma introdução incorrecta do mesmo no calorímetro.

4.1. Ensaio calorimétricos

Na Tabela 4.1 encontram-se resumidos todos os valores obtidos nos ensaios calorimétricos, bem como o coeficiente de variação. Estes resultados estão também reunidos na Figura 4.1, para o lenho inicial, e na Figura 4.2 para o lenho final. Constatou-se, como era de esperar, que o valor do PCS diminuiu com o aumento da humidade relativa, para ambos os tipos de lenho.

O valor máximo obtido experimentalmente para o poder calorífico superior foi de 19,532 MJ/kg para o lenho final, na humidade relativa de 11% e temperatura de 65°C. É de notar que, os valores obtidos experimentalmente para o lenho final, são sempre superiores aos valores obtidos para o lenho inicial.

Tabela 4.1: Valores médios de PCS para cada temperatura e humidade relativa.

Humidade Relativa	11%	30%	50%	60%	75%	80%	Temperatura		
							(°C)	Valor médio de PCS (MJ/kg)	
Lenho Inicial	35	19,109	18,340	18,300	17,905	17,716	17,424		
		0,218	1,276	0,809	0,872	0,719	0,900		
	45	19,018	18,530	18,308	18,045	17,895	17,592		
		0,219	1,263	0,809	0,865	0,712	0,891		
	55	19,021	18,083	18,274	17,803	17,759	17,313		
		0,219	1,294	0,811	0,877	0,717	0,905		
	65	19,002	17,920	18,635	18,219	18,042	17,723		
		0,219	1,306	0,795	0,857	0,706	0,884		
	Lenho Final	35	19,293	18,658	18,504	17,997	17,910	17,531	
			0,458	1,095	0,548	1,206	1,313	1,379	
		45	19,468	18,615	18,603	18,145	18,095	17,752	
			0,454	1,098	0,545	1,196	1,300	1,361	
55		19,462	18,214	18,519	17,879	17,872	17,510		
		0,454	1,122	0,547	1,214	1,316	1,380		
65		19,532	18,244	18,759	18,458	18,466	18,111		
		0,453	1,120	0,540	1,176	1,274	1,334		

Pode ainda verificar-se, através da Tabela 4.1, que o coeficiente de variação, tanto para o lenho inicial como para o lenho final, não ultrapassa 1,5%. A diferença entre os valores de PCS para a temperatura de 35°C e 65°C, para o caso da humidade atmosférica de 11%, são de aproximadamente de 0,56%. No entanto, para esses dois valores verifica-se uma dispersão de 0,218%. Com isto, pode verificar-se que o factor temperatura não influencia o valor final do PCS. O mesmo pode ser verificado para as restantes humidades relativas. Para o caso do lenho final, e humidade relativa de 80%, constata-se uma diferença do valor de PCS de aproximadamente 3,2% entre a temperatura de 35°C e 65 °C. No entanto, os valores de dispersão rondam os 1,3%, podendo assim concluir-se, tal como constatado anteriormente, que o factor temperatura não influencia o valor final do PCS.

Ao longo do trabalho de Esteves (2009), o teor de água dos provetes é determinado pela seguinte expressão:

$$M_e = \frac{m_h - m_0}{m_0} \times 100$$

onde m_0 representa a massa dos provetes secos e m_h a massa dos provetes quando estes estão em equilíbrio. Deste modo, calculou-se os teores de água no interior da amostra para cada temperatura, sendo apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Teor de água no interior da amostra (%).

Humidade Relativa / Temperatura	35°C	45°C	55°C	65°C
11%	1,2	1,2	0,3	0,4
30%	3,2	3,6	8,2	7,6
50%	3,9	3,0	5,3	4,5
60%	6,3	6,2	9,5	5,7
75%	7,2	6,4	8,3	6,5
80%	8,7	7,2	10,5	7,2

A Figura 4.1 e 4.2 tem sintetizado os valores de PCS obtidos experimentalmente para os diferentes teores de água na amostra.

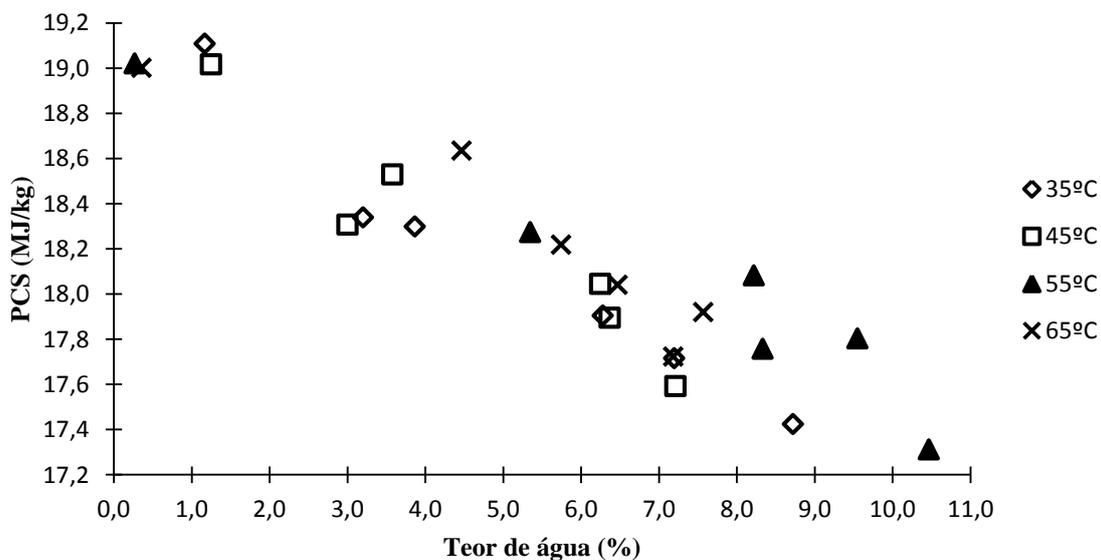


Figura 4.1: Valores médios de PCS para o lenho inicial em função do teor de água (%).

Analisando a Figura 4.1 verifica-se que à medida que existe um aumento gradual do teor de água no interior da amostra, independentemente da temperatura de acondicionamento, o poder calorífico superior diminui. A diferença de PCS máxima e mínima para cada temperatura é maior na temperatura de 55°C, verificando-se uma diferença entre ambos de 8,99%. No entanto, os valores do coeficiente de variação apresentados na Tabela 4.1, não ultrapassam os 1,3%.

A Figura 4.2 apresenta as curvas de PCS em função do teor de humidade para o lenho final. Deste modo, constata-se que, com o aumento gradual do teor de água no interior da amostra, o valor final de PCS diminui.

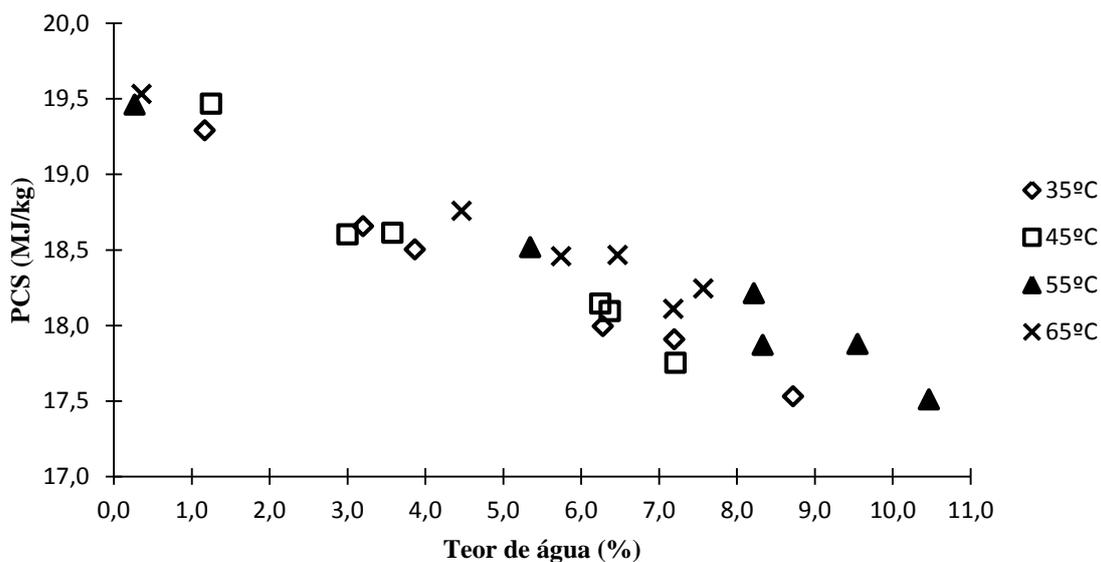


Figura 4.2: Valores médios de PCS para o lenho final em função do teor de água (%).

Para o lenho final, a diferença entre os valores máximo e mínimo para cada temperatura continua a verificar-se para as temperaturas de 55°C e 65°C, respectivamente. Deste modo, constata-se um comportamento idêntico entre ambos os lenhos, ou seja, à temperatura de ensaio de 55°C existe uma diferença de 10,03% entre os valores máximo e mínimo de PCS, enquanto que à temperatura de ensaio de 65°C é apresentada uma diferença de 7,275%. No entanto, os valores de coeficiente de variação são bastante baixos, indicando uma boa correlação entre os valores.

Observando as Figuras 4.1 e 4.2 constata-se que existe um padrão de resultados entre o lenho inicial e o lenho final. Para ambos os lenhos, o valor máximo de PCS encontra-se para o teor de água mais baixo, no entanto, quando o teor de água aumenta o PCS diminui gradualmente.

Capítulo 5

Modelação matemática

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica de modelos matemáticos de previsão do poder calorífico. Os modelos serão diferenciados em três subcapítulos, sendo eles, em função da composição química, em função do teor de humidade, e por último em função do teor de humidade e da composição química. Posteriormente, será realizada uma correlação entre os valores obtidos matematicamente e os valores experimentais.

5.1. Modelação matemática

O elevado preço que os combustíveis fósseis atingiram nos últimos anos, associado à diminuição das reservas de petróleo, tem vindo a incentivar a aposta nas energias renováveis como fonte de produção de energia.

A produção de energia através de biomassa florestal é uma das formas equacionadas para tentar diminuir a dependência do petróleo, e com a área florestal que Portugal possui, faz todo o sentido que seja realizada uma aposta nesta área.

O teor de humidade é um dos factores que mais influencia o potencial energético da biomassa florestal. Desta forma, é importante relacionar os valores de poder calorífico com o teor de humidade no interior da biomassa.

O poder calorífico da biomassa pode ser determinado através de um calorímetro, tendo como base a medição do calor libertado pela combustão da amostra. Na área da simulação matemática, a maior parte do trabalho realizado relaciona-se com a composição química da biomassa.

No presente capítulo, serão utilizados modelos de previsão do poder calorífico em função da humidade relativa e da composição química. Posteriormente, serão comparados com os obtidos no capítulo anterior.

De modo a poder-se avaliar o desempenho dos modelos matemáticos em função da composição química e posteriormente efectuar comparação com os resultados experimentais, será necessário conhecer a composição química da madeira de *Pinus pinaster*. Como tal, utilizar-se-á a composição química expressa no trabalho de Telmo *et al.* (2010), apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Composição química da madeira *Pinus pinaster* [%](Telmo *et al.*, 2010).

Espécie	ASH	VM	FC	T_C	T_H	T_O	T_N	T_S
<i>Pinus Pinaster</i>	0,2	85,8	14,1	48,4	6,0	45,3	0,1	0,00

Os modelos que serão apresentados possuem nomenclaturas em comum e que detêm o seguinte significado: T_c – Teor de carbono (kg_{carbono}/kg_{combustível}); T_h – Teor de hidrogénio (kg_{hidrogénio}/kg_{combustível}); T_o – Teor de oxigénio (kg_{oxigénio}/kg_{combustível}); T_s – Teor de enxofre (kg_{enxofre}/kg_{combustível}); ASH – Teor de cinzas (%); V_m – Teor de Matéria volátil (%); F_c – Teor de Carbono fixo (%); W – Teor de humidade (%); PCI_{bs} – Poder Calorífico Inferior base seca [MJ/kg]; ρ – Massa específica básica [kg/m³].

5.1.1. Modelos matemáticos em função da composição química

Ao longo do presente subcapítulo, serão apresentados modelos de previsão do poder calorífico em função da composição química da matéria, seleccionados após pesquisa bibliográfica.

Esta classe de modelos depende directamente da composição química do material. Sendo a madeira um material heterogéneo, a sua constituição química reflecte-se directamente nas suas propriedades físicas e conseqüentemente no seu poder calorífico.

Schurhaus (2007), propôs um do modelo de previsão do PCS em função da composição química. Este, expresso em kJ/kg, é obtido através da seguinte expressão:

$$PCS = 33900 \times Tc + 141800 \times \left(Th - \frac{To}{8} \right) + 9200 \times Ts \quad (5.1)$$

Através do princípio de conservação da energia, Dulong descreve o poder calorífico superior de um combustível seco, sólido ou líquido, através da sua composição química em kcal/kg.

$$PCS = 8140 \times Tc + 34400 \times \left(Th - \frac{To}{8} \right) + 2220 \times Ts \quad (5.2)$$

Dulong desenvolveu a expressão anterior com o intuito de encontrar uma equação para o PCI em função da composição química em kcal/kg.

$$PCI = 8140 \times Tc + 29000 \times \left(Th - \frac{To}{8} \right) + 2220 \times Ts \quad (5.3)$$

Schuster propôs uma correlação baseada na matéria volátil para determinar o valor do PCS do carvão em função da matéria volátil (V_m) (Majunder et al, 2008).

$$PCS = 4,183 \times 10^{-3} \times (8000 + V_m \times (70 - 1,65 \times V_m)) \quad (5.4)$$

Kucukbayrak também propôs um modelo baseado na matéria volátil (V_m) e no teor de cinzas (ASH) em MJ/kg (Majunder et al, 2008):

$$PCS = 76,56 - 1,3(V_m + ASH) + 7,03 \times 10^{-3} \times (V_m + ASH)^2 \quad (5.5)$$

Uma simples equação baseada na análise e aproximação de valores experimentais com valores teóricos, é apresentada no trabalho de Majunder *et al* (2008), tendo sido determinada pelo matemático Cordero *et al*, permitindo calcular o poder calorífico para materiais lenho celulósicos. Esta equação relaciona o carbono fixo (F_c) com a matéria volátil em KJ/kg (V_m) (Majunder *et al*, 2008).

$$PCS = 354,3F_c + 170,8 \times V_m \quad (5.6)$$

Para a determinação do poder calorífico da biomassa, Majunder *et al* (2008), apresenta uma equação de determinada por Dermirbas definida pela seguinte equação em MJ/kg (Majunder *et al*, 2008):

$$PCS = 0,196F_c + 14,119 \quad (5.7)$$

Jimenez e Gonzalez (1991) propuseram uma nova correlação para materiais lenho celulósicos baseada no carbono fixo (F_c) e na matéria volátil (V_m) com unidades em Kcal/kg (Majunder *et al*, 2008):

$$PCS = -1084,08 + 313,3 \times (F_c + V_m) \quad (5.8)$$

Parikh *et al*. desenvolveu uma expressão para o poder calorífico superior, relacionando a matéria volátil (V_m), o carbono fixo (F_c) e o teor de cinzas (ASH) em MJ/kg (Majunder *et al*, 2008).

$$PCS = 0,3536 \times F_c + 0,1559 \times V_m - 0,0078 \times ASH \quad (5.9)$$

Ao longo do trabalho de Erol, Haykiri-Acma & Kuçukbayrak (2009), são apresentados varios modelos para a determinação do poder calorifico superior em função do carbono fixo (F_c), teor de cinzas (ASH) e da matéria volátil (V_m). De seguida são apresentadas as expressões expressas em MJ/kg.

- I. $PCI = 15,2 + 0,192 \times F_c$
- II. $PCI = 14,2 + 0,38 \times F_c - 0,00721 \times F_c^2$
- III. $PCI = 14,4 + 0,382 \times F_c - 0,00758 \times F_c^2 + 0,0471 \times ASH$
- IV. $PCI = 13,0 + 0,392 \times F_c - 0,00735 \times F_c^2 - 0,0231 \times ASH + 0,0149 \times V_m$
- V. $PCI = 13,8 + 0,402 \times F_c - 0,00833 \times F_c^2 + 0,742 \times ASH^{-1} + 0,0003 \times (V_m \times ASH)$
- VI. $PCI = -5,9 + 0,836 \times F_c - 0,0116 \times F_c^2 + 0,00209 \times V_m^2 + 0,0325 \times ASH^2$
- VII. $PCI = 11,6 + 0,266 \times F_c + 0,0371 \times V_m + 0,0206 \times ASH^2$
- VIII. $PCI = 356 - 3,2 \times F_c - 3,41 \times (V_m + ASH)$
- IX. $PCI = 34,4 - 0,226 \times (V_m + ASH) + 0,0356 \times V_m + 0,00019 \times (V_m \times ASH)$
- X. $PCI = 18,2 + 0,137 \times F_c - 0,00031 \times V_m^2 - 0,0071 \times ASH^2$

5.1.2. Modelos matemáticos em função do teor de humidade

O teor de humidade é, talvez, o factor mais importante na produção de energia através da biomassa florestal. A biomassa recolhida na floresta necessita de alguma secagem ao ar livre, ou dentro de uma estufa, reduzindo drasticamente o teor de humidade, facilitando assim o seu transporte e melhorando o seu potencial energético.

Alguns autores enunciam que o teor de humidade da madeira influencia directamente o poder calorífico da madeira, ou seja, à medida que se aumenta o teor de

humidade o poder calorífico diminui. Deste modo, interessa encontrar expressões que prevejam a variação do poder calorífico em função do teor de humidade.

Ao longo do trabalho de Gomes *et al.* (2006), é proposto um modelo que visa relacionar o poder calorífico inferior com o teor de humidade da amostra, baseado no valor de PCI em base seca. Este modelo foi construído através de um polinómio de quarta ordem e é expresso em MJ/kg.

$$PCI = PCI_{bs} [1 + 1,02 \times 10^{-9} \times w^4 - 4,73 \times 10^{-7} w^3 + 9,15 \times 10^{-5} \times w^2 - 11,054 \times 10^{-3} \times w] \quad (5.10)$$

No trabalho de Gatto *et al.* (2003), é utilizado uma expressão para o cálculo do PCI em função do teor de humidade e da massa volúmica da madeira expressa em Kwh/m³.

$$PCI = \rho \times \left(4500 - 52 \times \left(\frac{w}{1 + \left(\frac{w}{100} \right)} \right) \right) \times 0,001162294 \quad (5.11)$$

5.1.3. Modelos matemáticos em função do teor de humidade e composição química

A composição química da madeira define as características físicas da madeira, e a capacidade de receber mais ou menos teor de humidade. Deste modo, torna-se importante verificar modelos matemáticos que contenham as variáveis composição química e teor de humidade, podendo assim ser comparados com os modelos anteriormente apresentados.

No trabalho de Ciganas & Raila (2010), é utilizado um modelo de previsão para o poder calorífico inferior em função do teor de humidade, composição química e do poder calorífico superior.

$$PCI = PCS \times \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2,447 \times \frac{w}{100} - \frac{t_h}{100 \times 2} \times 18,02 \times 2,447 \times \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (5.12)$$

A unidade principal deste modelo é MJ/kg.

No trabalho de Schurhaus é expressa uma expressão de Dulong para descrever o fenómeno da variação do PCI, tendo como unidades kcal/kg. (Schurhaus, 2007).

$$PCI = 8140 \times T_c + 29000 \times \left(T_h - \frac{T_o}{8}\right) + 2220 \times T_s - 600 \times T_w \quad (5.13)$$

A Associação de Engenheiros Alemães desenvolveu uma expressão para a determinação do PCI em função da composição química e do teor de humidade, expresso em kcal/kg (Schurhaus, 2007).

$$PCI = 8080 \times T_c + 29000 \times \left(T_h - \frac{T_o}{8}\right) + 2500 \times T_s - 600 \times T_w \quad (5.14)$$

Hutte propôs um modelo, apresentado no trabalho de Schurhaus, muito semelhante ao proposto por Dulong, com o intuito de prever este mesmo fenómeno, possuindo como unidade principal kcal/kg. (Schurhaus, 2007).

$$PCI = 8100 \times T_c + 29000 \times \left(T_h - \frac{T_o}{8}\right) + 2500 \times T_s - 600 \times T_w \quad (5.15)$$

Na conclusão do trabalho de Majumder *et al.* (2008), é apresentado um modelo que relaciona o carbono fixo (F_c), a matéria volátil (V_m), teor de cinzas (ASH) e ainda o teor de humidade da amostra (w), tendo como unidades MJ/kg.

$$PCS = -0,03 \times ASH - 0,11 \times w + 0,33(V_m) + 0,35(F_c) \quad (5.16)$$

No trabalho de Schurhaus (2007), é apresentado o seguinte modelo para prever o poder calorífico inferior em J/kg:

$$PCI = PCS - 2440 \times (9 \times T_h + w) \quad (5.17)$$

5.2. Correlação dos modelos matemáticos com os valores experimentais

Com o intuito de encontrar o modelo que melhor descreve o poder calorífico da madeira *Pinus pinaster*, pretende-se relacionar os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos numericamente.

Os valores obtidos experimentalmente são valores para o poder calorífico superior, como tal, é necessário transformá-los em poder calorífico inferior, para assim ser possível obter uma correlação. O poder calorífico inferior é obtido pela diferença entre o poder calorífico superior e o calor latente de vaporização durante a combustão da madeira.

Almeida (2004), descreve que o calor latente de vaporização da água, expresso em kJ/kg pode ser calculado no intervalo de temperaturas entre 0 a 200°C com uma precisão de cerca de 0,02% pela fórmula empírica de Regnault:

$$L_v = 2538,2 + 2,91 \times T \quad (5.18)$$

onde L_v representa o valor para o calor latente de vaporização da água (KJ/kg) e T o valor da temperatura (°C).

Para calcular a entalpia de vaporização podemos recorrer aos diagramas T-S da termodinâmica clássica. Analisando um diagrama T-S observa-se que à esquerda do ponto crítico temos a linha de líquido saturado, e à direita, a linha de vapor saturado. A ligação entre estes dois estados é feita por linhas isobáricas.

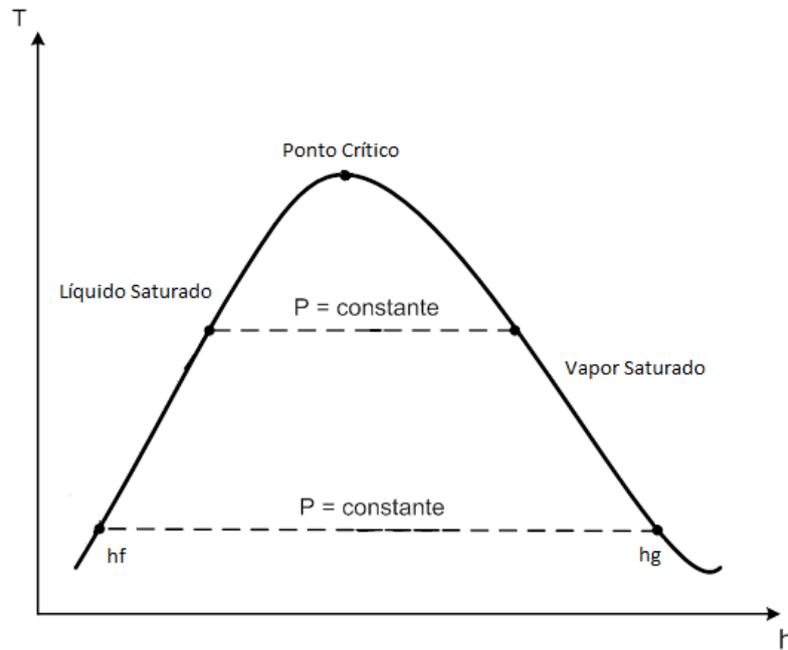


Figura 5.1:Diagrama T-S

O calor latente de vaporização vai depender da temperatura, e é designado como sendo a energia necessária para transpor do estado líquido saturado (h_f) para o estado de vapor saturado (h_g). O calor latente de vaporização é calculado pela diferença entre os valores de h_g e h_f , valores esses, retirados directamente das tabelas termodinâmicas (Sonntag *et al*, 2002). Deste modo, o calor latente de vaporização é dado pela seguinte expressão:

$$L_v = h_g - h_f = h_{fg} \quad (5.19)$$

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores do calor latente de vaporização para as quatro temperaturas utilizadas no trabalho experimental, calculado pela equação 5.19.

Tabela 5.2: Calor latente de vaporização (Sonntag *et al.*, 2002).

Temperatura (°C)	Calor latente de vaporização (KJ/kg)
35	2418,62
45	2394,77
55	2370,66
65	2346,21

Para relacionar os modelos que descrevem o poder calorífico em função da composição química foi necessário utilizar a média dos valores obtidos experimentalmente. Estes são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3: Valores de PCS para o lenho inicial (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	19,109	19,018	19,021	19,002
30	18,340	18,530	18,083	17,920
50	18,300	18,308	18,274	18,635
60	17,905	18,045	17,803	18,219
75	17,716	17,895	17,759	18,042
80	17,424	17,592	17,313	17,723

Tabela 5.4: Valores de PCS para o lenho final (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	19,293	19,468	19,462	19,532
30	18,658	18,615	18,214	18,244
50	18,504	18,603	18,519	18,759
60	17,997	18,145	17,879	18,458
75	17,910	18,095	17,872	18,466
80	17,531	17,752	17,510	18,111

Utilizando a expressão de Almeida (2004), converteram-se os valores de poder calorífico superior em poder calorífico inferior, apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Valores de PCI para o lenho inicial (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	15,691	15,600	15,604	15,585
30	14,922	15,113	14,666	14,503
50	14,882	14,891	14,857	15,218
60	14,487	14,627	14,386	14,801
75	14,299	14,477	14,341	14,624
80	14,007	14,175	13,896	14,306

Através da tabela anterior é possível verificar que o valor máximo de PCI para o lenho inicial, é verificado para a humidade de 11% e temperatura de 35°C, com um valor de 15,691 MJ/kg. O valor mínimo de PCI é registado para a humidade de 80%, com um valor de 13,896. Resta ainda salientar que à medida que aumenta a humidade o valor de PCI diminui.

Tabela 5.6: Valores de PCI para o lenho final (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	15,876	16,051	16,045	16,115
30	15,240	15,197	14,797	14,827
50	15,087	15,186	15,101	15,342
60	14,579	14,728	14,461	15,041
75	14,492	14,678	14,455	15,049
80	14,114	14,335	14,093	14,694

No caso do lenho final, o valor máximo de 16,115 MJ/kg, é obtido na humidade de 11% com uma temperatura de 65 °C. Do mesmo modo, o valor mínimo de PCI regista-se para a humidade relativa de 80% e uma temperatura de 55°C.

De seguida foram obtidos os valores de PCI, a partir dos valores experimentais de PCS, recorrendo à termodinâmica clássica, fazendo recurso das tabelas termodinâmicas. Estes valores são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7: Valores de PCI do lenho inicial (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	16,690	16,599	16,651	16,656
30	15,921	16,111	15,712	15,574
50	15,881	15,890	15,904	16,289
60	15,486	15,626	15,433	15,873
75	15,298	15,476	15,388	15,695
80	15,006	15,174	14,942	15,377

Analisando a Tabela 5.7 verifica-se o valor máximo de 16,690 MJ/kg na temperatura de 35°C com uma humidade de 11%. Porém, verifica-se uma diferença de aproximadamente 1 MJ/kg entre este processo de conversão, e o que utilize a expressão de Almeida (2004), representando uma diferença de aproximadamente 6%.

Tabela 5.8: Valores de PCI para o lenho final (MJ/kg).

Humidade (%)	Temperatura			
	35 (°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
11	16,875	17,049	17,092	17,186
30	16,239	16,196	15,843	15,898
50	16,086	16,185	16,148	16,413
60	15,578	15,727	15,508	16,112
75	15,491	15,677	15,502	16,120
80	15,113	15,334	15,139	15,765

No caso do lenho final, verifica-se o valor máximo na temperatura de 65°C com a humidade de 11%, cujo valor é de 17,186 MJ/kg. No entanto, continua a verificar-se uma diferença, entre ambos os métodos de cálculo, de aproximadamente 1 MJ/kg, fazendo com que o presente método apresente valores de PCI superiores ao método de Almeida.

Como constatado pelas tabelas anteriores, ambos os lenhos possuem valor máximo de PCI na humidade relativa de 11%. No entanto, o lenho inicial constata esse valor na temperatura de 35°C, enquanto o lenho inicial só alcança o valor máximo na temperatura de 65°C. Esta diferença pode dever-se ao factor temperatura de acondicionamento, ou seja, à inércia térmica a que a estilha se encontra sujeita, que por sua vez é modelada como uma função da densidade do material e do calor específico do material. Segundo Louzada *et al.* (1994), a estilha de lenho final é por norma mais

denso que a estilha do lenho inicial. Deste modo o material torna-se mais compacto, diminuindo os espaços entre as partículas, que por sua vez facilita a retenção de calor no interior da sua estrutura. A estilha de lenho inicial é menos densa, logo possui maiores espaços entre cada partícula, proporcionando assim menor retenção de calor no seu interior. Assim sendo, pode verificar-se que a inércia térmica afecta directamente o valor final do poder calorífico da estilha de madeira.

No desenvolvimento deste trabalho serão utilizados os valores de PCI convertidos pela termodinâmica clássica, seguindo desta forma a aplicação das leis termodinâmicas ao caso em concreto, com o intuito de tentar diminuir o erro cometido.

5.2.1. Correlação dos modelos matemáticos em função da composição química

Os modelos matemáticos em função da composição química não dependem do teor de humidade, da temperatura e do tipo de lenho. Deste modo, foi necessário realizar uma média nos valores experimentais entre os lenhos, as temperaturas e as humidades, com o intuito de poder comparar o valor experimental com valor obtido matematicamente. Assim sendo, o valor médio para o poder calorífico inferior é de 15,900 MJ/kg.

A Tabela 5.9 apresenta os valores obtidos para o PCI através dos modelos matemáticos que descrevem apenas o poder calorífico inferior em função da composição química. O erro apresentado na Tabela 5.9 deriva da comparação dos valores de PCI obtidos através dos modelos matemáticos com a média de todos os valores do PCI obtidos experimentalmente.

Tabela 5.9: Valores de PCI modelados em função da composição química.

Modelo	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
Erol et al. I	17,907	11,207
Erol et al. II	18,125	12,272
Erol et al. III	18,289	13,059
Erol et al. IV	18,340	13,302
Erol et al. V	21,548	26,210
Erol et al. VI	18,969	16,176
Erol et al. VII	18,534	14,209
Erol et al. VIII	17,620	9,760
Erol et al. IX	18,035	11,836
Erol et al. X	17,849	10,919
Dulong	16,905	5,944

Através da Tabela 5.9 podemos concluir que o modelo que melhor descreve o PCI em função da composição química é o modelo de Dulong. Este modelo apresenta uma percentagem de erro de 5,944% em relação ao valor médio obtido experimentalmente.

O valor máximo obtido pelos modelos de PCI é de 21,548MJ/kg, valor este muito superior ao que foi possível obter experimentalmente. Assim sendo, este modelo apresentou um erro de aproximadamente 26 %.

Os valores anteriores foram comparados com a média do PCI dos lenhos, temperaturas e humidades. De seguida, serão comparados os valores obtidos pelos modelos anteriores com a média obtida para cada lenho.

Tabela 5.10: Valores de PCI modelados e comparados com o lenho inicial final.

Modelo	PCI (MJ/kg)	Erro lenho inicial (%)	Erro lenho final (%)
Erol et al. I	17,907	11,862	10,553
Erol et al. II	18,125	12,919	11,626
Erol et al. III	18,289	13,700	12,419
Erol et al. IV	18,340	13,940	12,663
Erol et al. V	21,548	26,753	25,666
Erol et al. VI	18,969	16,793	15,558
Erol et al. VII	18,534	14,841	13,577
Erol et al. VIII	17,620	10,425	9,095
Erol et al. IX	18,035	12,485	11,186
Erol et al. X	17,849	11,576	10,263
Dulong	16,905	6,637	5,252

Quando comparados os valores obtidos pela média de ambos os lenhos, Tabela 5.9, com os valores obtidos para cada lenho, Tabela 5.10, constata-se que existe um ligeiro aumento do erro correspondente à média do lenho inicial. Quando comparada a média do PCI entre ambos os lenhos com o lenho final, pode verificar-se uma ligeira diminuição do erro. O erro médio cometido na Tabela 5.9 é de 13,17%, enquanto que o erro médio cometido com a comparação à media do lenho inicial é de 13,812%, e com a média do lenho final de 12,533%. Assim sendo, conclui-se que, quando comparado com o lenho inicial o erro aumenta, e quando confrontado com o lenho final o erro diminui. O erro aumenta quando se compara com o lenho inicial visto que, o lenho inicial é menos denso e o seu poder calorífico é menor, logo a discrepância com os resultados experimentais é maior. No caso do lenho final, este é mais denso e é o constituinte que possui maior poder calorífico e o mais importante na constituição da madeira. Deste modo, quando comparamos o erro da media entre os lenhos com a média do PCI do lenho final, o erro tem tendência a diminuir.

Na Tabela 5.11 estão representados os valores obtidos pelos modelos que representam o poder calorífico superior em função da composição química. O valor médio do PCS experimental é de 18,283 MJ/kg.

Tabela 5.11: Valores de PCS modelados em função da composição química.

Modelo	PCS (MJ/kg)	Erro (%)
Schurhaus 2007	16,886	7,639
Dulong PCS	16,981	7,118
Kucukbayrak	16,754	8,363
Cordero <i>et al.</i>	19,650	6,959
Dermirbas	16,883	7,659
Jimenez e Gonzalez	15,082	17,506
Parikh <i>et al.</i>	18,394	0,606

Analisando a Tabela 5.11 é possível verificar que, o modelo que melhor descreve o poder calorífico superior é o modelo de Parikh *et al.* (2008). Este modelo apresenta um erro de 0,606% em relação aos valores experimentais. É de notar, novamente, que estes valores são comparados com a média dos valores experimentais, visto que estes modelos apenas dependem da composição química.

O modelo que apresenta um erro maior é o modelo de Jimenez e Gonzalez, com um erro de 17,506%.

O valor máximo de PCS obtido pelos modelos matemáticos, em função da composição química, é de 19,650 MJ/kg, valor esse, 6,96 % superior ao valor médio obtido experimentalmente.

Mais uma vez, torna-se importante efectuar a comparação dos valores modelados com a média do lenho inicial, e posteriormente com o lenho final. Deste modo perceber-se-á qual a relação entre os dois constituintes no poder calorífico final da madeira.

A Tabela 5.12 apresenta os erros cometidos quando comparados os valores modelados em função da composição química, com os valores médios do lenho inicial e os valores médios do lenho final

Tabela 5.12: Valores de PCS modelados em comparação com o lenho inicial e final.

Modelo	PCS (MJ/kg)	Erro lenho inicial (%)	Erro lenho final (%)
Schurhaus 2007	16,886	7,044	8,227
Dulong PCS	16,981	6,519	7,709
Kucukbayrak	16,754	7,772	8,946
Cordero <i>et al.</i>	19,650	7,555	6,363
Dermirbas	16,883	7,063	8,247
Jimenez e Gonzalez	15,082	16,974	18,031
Parikh <i>et al.</i>	18,394	1,243	0,031

Analisando a Tabela 5.12 pode constatar-se que, quando comparados os valores modelados com a média do lenho inicial, o erro desceu ligeiramente, exceptuando para o caso do modelo de Parikh *et al.* No caso de comparação com a média do lenho final, verificou-se que o erro aumentou, excluindo o caso dos modelos de Cordero *et al.* (2008) e de Parikh *et al.* (2008). Em termo geral, o erro cometido aumentou quando comparado com a média do lenho final, e diminui com a comparação à média do lenho inicial.

5.2.2. Correlação dos modelos matemáticos em função da humidade e composição química

Os valores obtidos matematicamente em função do teor de água e composição química serão apresentados por temperaturas, no entanto irão ser divididos de duas formas. Primeiramente são apresentados os valores de PCI que não dependem do PCS em base seca. Assim sendo, estes modelos serão comparados os valores obtidos experimentalmente para o lenho inicial e lenho final.

Tabela 5.13: Valores de PCI para a temperatura de 35°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro).

M_c (%)	1,2%	3,2%	3,9%	6,3%	7,2%	8,7%	Média
Dulong	16,875	16,825	16,807	16,747	16,724	16,687	<u>16,777</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,549</i>	<i>4,426</i>	<i>4,901</i>	<i>7,253</i>	<i>7,952</i>	<i>9,754</i>	<u>5,806</u>
Hutte	16,794	16,744	16,726	16,666	16,643	16,606	<u>16,696</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,069</i>	<i>3,963</i>	<i>4,440</i>	<i>6,802</i>	<i>7,504</i>	<i>9,313</i>	<u>5,349</u>
Engenheiros Alemães	16,753	16,703	16,686	16,625	16,603	16,565	<u>16,656</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,172</i>	<i>3,730</i>	<i>4,208</i>	<i>6,575</i>	<i>7,278</i>	<i>9,091</i>	<u>5,176</u>

Pela análise da Tabela 5.13 pode verificar-se, para todos os modelos, à medida que aumenta o teor de água, o valor de PCI diminui. Destes três modelos, o que apresenta um erro médio menor é o modelo criado pela Associação dos Engenheiros Alemães, com um erro médio de 5,176%, seguindo-se o modelo de Hutte e Dulong.

As Tabelas 5.14 e 5.15 têm representado os valores de PCI para o lenho inicial e lenho final, visto que estes modelos dependem da variável PCS em base seca. Assim sendo, é possível realizar uma comparação dos valores de PCI em função do lenho.

Tabela 5.14: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 35°C (Modelo/Erro).

M_c (%)	1,2%	3,2%	3,9%	6,3%	7,2%	8,7%	Média
Ciganas e Raila	18,829	18,825	18,823	18,818	18,816	18,813	<u>18,821</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,361</i>	<i>15,424</i>	<i>15,630</i>	<i>17,707</i>	<i>18,700</i>	<i>20,239</i>	<u>16,510</u>
Schurhaus	17,498	17,449	17,432	17,374	17,352	17,315	<u>17,403</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>4,618</i>	<i>8,756</i>	<i>8,896</i>	<i>10,863</i>	<i>11,837</i>	<i>13,338</i>	<u>9,718</u>

A Tabela 5.14 mostra que com o aumento gradual do teor de água na estilha, o poder calorífico inferior diminui. Um outro ponto importante depreende-se com o facto de todos os valores de PCI modelados serem superiores aos valores obtidos experimentalmente. No caso do modelo de Ciganas e Raila, em média, é 16,02 % superior. O modelo de Schurhaus, em média, é 9,18% superior à média dos valores experimentais.

O modelo de Ciganas e Raila apresenta um valor máximo de 18,829 MJ/kg quando o teor de água é de 1,2%. No caso do modelo de Schurhaus, o valor máximo apresentado é de 17,498 MJ/kg para o teor de humidade de 1,2%. Esta diferença de valores máximos para o PCI representa uma discrepância de aproximadamente 7,07%.

A Tabela 5.15 apresenta os valores de PCI, do lenho final e temperatura de 35°C, para os modelos de Ciganas e Raila e Schurhaus.

Tabela 5.15: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 35°C (Modelo/Erro).

M_c (%)	1,2%	3,2%	3,9%	6,3%	7,2%	8,7%	Média
Ciganas e Raila	19,205	19,200	19,199	19,194	19,192	19,189	<u>19,196</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>12,133</i>	<i>15,424</i>	<i>16,216</i>	<i>18,837</i>	<i>19,283</i>	<i>21,242</i>	<u><i>17,189</i></u>
Schurhaus	17,874	17,825	17,808	17,749	17,727	17,691	<u>17,779</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>5,589</i>	<i>8,897</i>	<i>9,671</i>	<i>12,232</i>	<i>12,615</i>	<i>14,574</i>	<u><i>10,596</i></u>

No caso do lenho final, o valor do PCI é superior ao obtido para o lenho inicial. No entanto, em ambos os lenhos, esse valor é máximo para o teor de água de 1,2%. O valor máximo para o modelo de Ciganas e Raila é de 19,205 MJ/kg, enquanto para o modelo de Schurhaus é de 17,874 MJ/kg, representando uma diferença de aproximadamente 6,9%.

O modelo de Ciganas e Raila apresenta um erro médio de 17,189%, que em relação ao modelo de Schurhaus, é ligeiramente superior. À medida que aumenta o teor de água no interior da amostra, o modelo de Ciganas e Raila e o modelo de Schurhaus apresentam alguma dificuldade em descrever a variação do PCI com o teor de humidade.

Resta ainda dizer, que os valores de PCI obtidos numericamente são superiores aos obtidos experimentalmente, eventualmente devido a erros associados com a utilização destes modelos.

Nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 estão representados os valores de poder calorífico obtidos para a temperatura de 45°C.

Tabela 5.16: Valor de PCI para a temperatura de 45°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro).

M_e (%)	1,2%	3,6%	3,0%	6,2%	6,4%	7,2%	Média
Dulong	16,875	16,815	16,830	16,749	16,744	16,724	<u>16,790</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,159</i>	<i>3,790</i>	<i>4,569</i>	<i>6,263</i>	<i>6,833</i>	<i>8,651</i>	<u><i>5,044</i></u>
Hutte	16,794	16,734	16,749	16,668	16,663	16,643	<u>16,709</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,322</i>	<i>3,324</i>	<i>4,107</i>	<i>5,807</i>	<i>6,380</i>	<i>8,206</i>	<u><i>4,691</i></u>
Engenheiros Alemães	16,753	16,693	16,708	16,628	16,623	16,603	<u>16,668</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,562</i>	<i>3,089</i>	<i>3,874</i>	<i>5,578</i>	<i>6,151</i>	<i>7,982</i>	<u><i>4,539</i></u>

Analisando a Tabela 5.16 pode verificar-se que, o modelo que melhor descreve a variação do PCI em função do teor de água na estilha, é o modelo utilizado pela Associação dos Engenheiros Alemães, seguido do modelo de Hutte e de Dulong.

Tabela 5.17: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 45°C (Modelo/Erro).

M_e (%)	1,2%	3,6%	3,0%	6,2%	6,4%	7,2%	Média
Ciganas e Raila	18,829	18,824	18,825	18,818	18,818	18,816	<u>18,822</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,716</i>	<i>14,284</i>	<i>15,468</i>	<i>16,836</i>	<i>17,632</i>	<i>19,233</i>	<u><i>15,861</i></u>
Schurhaus	17,498	17,439	17,454	17,376	17,371	17,352	<u>17,415</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>5,000</i>	<i>7,479</i>	<i>8,827</i>	<i>9,933</i>	<i>10,771</i>	<i>12,415</i>	<u><i>9,071</i></u>

Através da Tabela 5.17 pode verificar-se que, com o aumento do teor de água no interior da amostra, o PCI diminui. O valor máximo de PCI é obtido para a o teor de água de 1,2%, sendo de 18,829MJ/kg para o modelo de Ciganas e Raila, e de 17,498 MJ/kg para o modelo de Schurhaus. Em média, o erro cometido pela expressão de Ciganas e Raila em relação ao modelo de Schurhaus é de aproximadamente 42,9%. Deste modo, constata-se que o modelo de Schurhaus descreve com mais precisão a variação do PCI em função do teor de água no interior da amostra.

Tabela 5.18: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 45°C (Modelo/Erro).

M_c (%)	1,2%	3,6%	3,0%	6,2%	6,4%	7,2%	Média
Ciganas e Raila	19,205	19,200	19,201	19,194	19,194	19,192	<u>19,197</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,099</i>	<i>15,520</i>	<i>15,585</i>	<i>17,940</i>	<i>18,199</i>	<i>19,978</i>	<u><i>16,387</i></u>
Schurhaus	17,874	17,815	17,830	17,752	17,747	17,727	<u>17,791</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>4,479</i>	<i>8,955</i>	<i>9,094</i>	<i>11,273</i>	<i>11,531</i>	<i>13,367</i>	<u><i>9,783</i></u>

No caso do lenho final, pode verificar-se que o valor máximo de PCI, tanto para o modelo de Ciganas e Raila como para o modelo de Schurhaus, é ligeiramente superior quando comparado com o obtido para o lenho inicial. No entanto, à medida que o teor de água na amostra aumenta, os modelos apresentam maior dificuldade na descrição da variação do PCI.

Tabela 5.19: Valor de PCI para a temperatura de 55°C para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro).

M_c (%)	0,3%	8,2%	5,3%	9,5%	8,3%	10,5%	Média
Dulong	16,898	16,699	16,772	16,667	16,697	16,641	<u>16,729</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,156</i>	<i>5,517</i>	<i>4,449</i>	<i>7,177</i>	<i>7,498</i>	<i>9,618</i>	<u><i>5,736</i></u>
Hutte	16,817	16,618	16,691	16,585	16,616	16,560	<u>16,648</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,324</i>	<i>5,056</i>	<i>3,985</i>	<i>6,723</i>	<i>7,047</i>	<i>9,176</i>	<u><i>5,385</i></u>
Engenheiros Alemães	16,776	16,578	16,650	16,545	16,575	16,520	<u>16,607</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,564</i>	<i>4,824</i>	<i>3,751</i>	<i>6,495</i>	<i>6,820</i>	<i>8,953</i>	<u><i>5,234</i></u>

Na Tabela 5.19 estão representados os valores de PCI modelados para a temperatura de 55°C, no qual não existe distinção do lenho. Desta forma, verifica-se que o valor máximo de PCI é obtido para o teor de água de 0,3%, para ambos os modelos. O valor mínimo é obtido para o teor de água de 10,5%. É de notar, que o modelo com melhor precisão na descrição da variação do PCI, é o modelo desenvolvido pela Associação dos Engenheiros Alemães, com um erro médio de 5,234%. No entanto, quando comparado com o valor obtido para a temperatura de 45°C, verificou-se um aumento do erro em aproximadamente 13,28%.

Tabela 5.20: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 55°C (Modelo/Erro).

M_c (%)	0,3%	8,2%	5,3%	9,5%	8,3%	10,5%	Média
Ciganas e Raila	18,831	18,814	18,820	18,811	18,814	18,809	<u>18,817</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,578</i>	<i>16,487</i>	<i>15,497</i>	<i>17,961</i>	<i>18,210</i>	<i>20,559</i>	<u><i>16,715</i></u>
Schurhaus	17,520	17,327	17,398	17,295	17,325	17,271	<u>17,356</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>4,962</i>	<i>9,320</i>	<i>8,588</i>	<i>10,771</i>	<i>11,180</i>	<i>13,484</i>	<u><i>9,717</i></u>

No caso em que é possível distinguir os lenhos, constata-se através da Tabela 5.20, para o caso do lenho inicial, que o modelo de Schurhaus apresenta uma melhor correlação quando comparado com o modelo de Ciganas e Raila. No entanto, quando comparado com o erro médio obtido na temperatura de 45°C constata-se um aumento de aproximadamente 6,65%.

Tabela 5.21: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 55°C (Modelo/Erro).

M_c (%)	0,3%	8,2%	5,3%	9,5%	8,3%	10,5%	Média
Ciganas e Raila	19,207	19,190	19,196	19,187	19,189	19,185	<u>19,192</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,012</i>	<i>17,438</i>	<i>15,878</i>	<i>19,173</i>	<i>19,218</i>	<i>21,086</i>	<u><i>17,301</i></u>
Schurhaus	17,896	17,703	17,774	17,671	17,700	17,647	<u>17,732</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>4,492</i>	<i>10,505</i>	<i>9,147</i>	<i>12,241</i>	<i>12,423</i>	<i>14,209</i>	<u><i>10,503</i></u>

Analisando a Tabela 5.21, verifica-se que para o caso do lenho final, o modelo de Schurhaus continua a ser o modelo que apresenta melhores resultados. No entanto, quando comparado com o valor obtido para o lenho final à temperatura de 45°C verifica-se um aumento de 6,85% do erro médio. É de notar ainda, que os valores de PCI obtidos através de modelação são superiores aos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 5.22: Valor de PCI para a temperatura de 65°C, para a média de ambos os lenhos (Modelo/Erro).

M_c (%)	0,4%	7,6%	4,5%	5,7%	6,5%	7,2%	Média
Dulong	16,895	16,714	16,792	16,762	16,742	16,724	<u>16,772</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,153</i>	<i>5,852</i>	<i>2,628</i>	<i>4,592</i>	<i>4,984</i>	<i>6,897</i>	<u><i>4,184</i></u>
Hutte	16,814	16,633	16,711	16,681	16,661	16,643	<u>16,691</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,632</i>	<i>5,393</i>	<i>2,155</i>	<i>4,128</i>	<i>4,521</i>	<i>6,443</i>	<u><i>3,879</i></u>
Engenheiros Alemães	16,774	16,593	16,671	16,640	16,620	16,603	<u>16,650</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>0,872</i>	<i>5,162</i>	<i>1,917</i>	<i>3,894</i>	<i>4,288</i>	<i>6,215</i>	<u><i>3,725</i></u>

Na Tabela 5.22, estão apresentados os valores modelados para a temperatura de 65°C, no qual não foi possível distinguir os lenhos. Pode constatar-se que com o aumento do teor de água, o PCI diminui, sendo que o valor máximo é registado para o teor de água de 0,4%. Mais uma vez, o modelo utilizado pela Associação dos Engenheiros Alemães apresenta melhores resultados. No entanto, é importante salientar que, quando comparados com os resultados obtidos para a temperatura de 35°C,

verifica-se uma ligeira diminuição no erro cometido pelas expressões. No caso do modelo da Associação dos Engenheiros Alemães, esta diminuição ronda os 28%.

Tabela 5.23: Valor de PCI para o lenho inicial e temperatura 65°C (Modelo/Erro).

M_e (%)	0,4%	7,6%	4,5%	5,7%	6,5%	7,2%	Média
Ciganas e Raila	18,831	18,815	18,822	18,820	18,818	18,816	<u>18,820</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>11,549</i>	<i>17,227</i>	<i>13,459</i>	<i>15,659</i>	<i>16,594</i>	<i>18,279</i>	<u><i>15,461</i></u>
Schurhaus	17,518	17,342	17,417	17,388	17,369	17,352	<u>17,398</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>4,918</i>	<i>10,193</i>	<i>6,480</i>	<i>8,716</i>	<i>9,635</i>	<i>11,381</i>	<u><i>8,554</i></u>

Através da Tabela 5.23 constata-se que o modelo de Schurhaus descreve com mais rigor a variação do PCI em função do teor de água na amostra. No entanto, os valores obtidos pelo modelo de Ciganas e Raila são 11,55% superiores aos resultados experimentais, e 4,92% no caso de Schurhaus.

Tabela 5.24: Valor de PCI para o lenho final e temperatura de 65°C (Modelo/Erro).

M_e (%)	0,4%	7,6%	4,5%	5,7%	6,5%	7,2%	Média
Ciganas e Raila	19,207	19,191	19,198	19,195	19,193	19,192	<u>19,196</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>10,520</i>	<i>17,158</i>	<i>14,505</i>	<i>16,061</i>	<i>16,013</i>	<i>17,856</i>	<u><i>15,352</i></u>
Schurhaus	17,893	17,718	17,793	17,764	17,744	17,727	<u>17,773</u>
<i>Erro (%)</i>	<i>3,953</i>	<i>10,269</i>	<i>7,757</i>	<i>9,299</i>	<i>9,156</i>	<i>11,070</i>	<u><i>8,584</i></u>

Para o caso do lenho final, constata-se através da Tabela 5.24 que, os valores máximos de PCI são observados no teor de água de 0,4%. Pode ainda verificar-se que os valores de PCI do lenho final são superiores aos obtidos para o caso do lenho inicial.

Através dos valores apresentados nas tabelas anteriores pode concluir-se que, no caso em que não se pode realizar distinção do lenho, o modelo que melhor descreve a variação do PCI em função do teor de água é o modelo desenvolvido pela Associação dos Engenheiros Alemães. Quando procedemos à distinção do lenho, constata-se que o modelo de Schurhaus apresenta melhores correlações.

5.2.3. Correlação dos modelos matemáticos em função do teor de humidade

No decorrer deste subcapítulo serão apresentados dois modelos de previsão do PCI em função do teor de humidade, sendo eles o modelo utilizado por Gatto *et al.* (2003) e o modelo desenvolvido por Gomes *et al.* (2006).

O modelo de Gatto é um modelo baseado no teor de humidade da madeira e na massa volúmica básica da madeira de *Pinus pinaster*. Ao longo do trabalho de Lousada *et al.* (2008), foi determinado experimentalmente o valor para a massa volúmica básica da madeira de *Pinus pinaster* de 0,469 g/cm³.

Na Tabela 5.25 são apresentados os valores modelados com o modelo de Gatto *et al.* (2003) para a temperatura de 35°C, bem como o erro em relação aos valores experimentais.

Tabela 5.25: Valor de PCI para o modelo de Gatto *et al.* (2003) para a temperatura de 35°C.

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	18,571	9,632
3,2	18,154	11,426
3,9	18,216	12,256
6,3	17,540	11,445
7,2	17,368	11,363
8,7	17,088	11,872

Pelo modelo de Gatto *et al.* não é possível distinguir o lenho inicial do lenho final, deste modo foi necessário realizar a média dos valores dos lenhos, para realizar uma comparação entre os valores modelados e os valores experimentais.

Ao analisar a Tabela 5.25 é possível verificar que com o aumento da humidade relativa o PCI diminui, tal como seria de esperar. O PCI máximo é observado para o teor de água de 1,2% com o valor de 18,571 MJ/kg e com um erro de 9,632% relativamente aos resultados experimentais. Por último, é constatado que, com o aumento do teor de água o erro do modelo mantém-se aproximadamente dentro do erro médio.

No entanto, como o erro é relativamente significativo, pode dizer-se que este modelo não descreve com rigor a variação do PCI em função da humidade relativa.

Tabela 5.26: Valor de PCI para o modelo de Gato *et al.* (2003) para a temperatura de 45°C.

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	18,571	9,278
3,6	18,073	10,488
3,0	18,195	11,731
6,2	17,559	10,585
6,4	17,520	10,959
7,2	17,368	12,035

Na Tabela 5.26 estão expressos os valores modelados pelo modelo de Gatto *et al* (2003) para a temperatura de 45°C. O valor máximo de PCI, 18,571 MJ/kg, é verificado para o teor de água na estilha de 1,2%. O erro médio cometido pela expressão de Gatto *et al* (2003) é de aproximadamente 10,846%, sendo ligeiramente inferior ao verificado na temperatura de 35°C.

Tabela 5.27: Valor de PCI para o modelo de Gato *et al.* (2003) para a temperatura de 55°C.

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	18,764	10,088
8,2	17,180	8,163
5,3	17,734	9,632
9,5	16,941	8,683
8,3	17,162	10,004
10,5	16,762	10,266

Para o caso da temperatura de 55 °C, apresentado na Tabela 5.27, constata-se que o valor máximo de PCI encontra-se no teor de água da amostra mais baixo. O erro médio cometido pela expressão é de aproximadamente 9,473%, sendo ligeiramente inferior ao erro cometido para as teperaturas de 35 e 45°C. É de salientar que, em média, o valor de PCI obtido pelo modelo matemático, é 9,48% superior aos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 5.28: Valor de PCI para o modelo de Gato *et al.* (2003) para a temperatura de 65°C.

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,4	18,742	9,718
7,6	17,292	8,999
4,5	17,892	8,614
5,7	17,656	9,422
6,5	17,501	9,106
7,2	17,368	10,346

Através da Tabela 5.28 constata-se que o valor máximo de PCI é de 18,742 MJ/kg, com um erro em relação aos resultados experimentais de 9,718%. O erro médio cometido pela expressão na temperatura de 65 °C é de aproximadamente 9,37%. Este erro é ligeiramente inferior aos erros obtidos para as temperaturas anteriores. No entanto, os valores de PCI modelados são superiores aos valores obtidos experimentalmente.

Resta ainda salientar que, a expressão de Gatto *et al.* (2003), apresenta erros na ordem dos 10%, indicando que o modelo não descreve com rigor o fenómeno da variação do PCI em função do teor de água na amostra.

O modelo de Gomes *et al.* (2006) é uma expressão matemática criada em função do teor de humidade e do poder calorífico inferior da biomassa em base seca. Portanto, neste modelo utilizaram-se os valores experimentais de PCI com a estilha de madeira totalmente seca, sendo possível realizar distinção entre os lenhos. Nas Tabelas seguintes são apresentados os valores calculados numericamente para o modelo de Gomes *et al.* (2006).

Tabela 5.29: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 35°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,039	3,898
3,2	15,693	1,435
3,9	15,574	1,933
6,3	15,178	1,989
7,2	15,034	1,726
8,7	14,797	1,388

Observando a Tabela 5.29 percebe-se que os valores de PCI em relação aos valores experimentais são bastante próximos. O erro associado a cada valor de PCI da expressão é pouco significativo, sendo o mínimo de 1,39% e o máximo de 3,9%. Deste

modo, pode dizer-se que este modelo descreve de forma adequada o PCI em função do teor de humidade.

Tabela 5.30: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 35°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,410	2,753
3,2	16,056	1,129
3,9	15,934	0,941
6,3	15,529	0,316
7,2	15,381	0,710
8,7	15,139	0,178

A Tabela 5.30 apresenta os valores de PCI para o lenho final obtidos pelo modelo de Gomes *et al.* (2006). O valor de PCI sofreu um ligeiro aumento em relação ao valor de PCI para o lenho inicial, sendo o valor máximo de 16,410 MJ/kg. Como era de esperar, à medida que aumenta a humidade relativa, o PCI diminui consideravelmente. No que diz respeito ao erro do modelo, verifica-se uma diminuição em relação aos obtidos para o lenho inicial, apresentando um mínimo de 0,178% e um máximo de 2,753%.

Tabela 5.31: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 45°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,039	3,512
3,6	15,625	3,162
3,0	15,727	1,171
6,2	15,194	2,913
6,4	15,162	2,182
7,2	15,034	1,078

Na Tabela 5.31 constata-se que o valor máximo de PCI é de 16,039MJ/kg, com um erro em relação aos resultados experimentais de 3,512%. O erro médio cometido pela expressão para a temperatura de 45°C é de 2,34%, indicando pouca diferença entre os resultados experimentais e modelados. Os valores obtidos pelo modelo de Gomes *et al.* (2006) são inferiores aos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 5.32: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 45°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,410	3,884
3,6	15,986	1,441
3,0	16,091	0,727
6,2	15,546	1,302
6,4	15,512	1,197
7,2	15,381	0,152

No caso do lenho final, verifica-se que os valores de PCI são 2,26% superiores aos valores obtidos para o lenho final. No que diz respeito ao erro médio cometido, verifica-se um erro médio de 2,79%, sendo que o erro máximo cometido é de 3,884% para o teor de água de 1,2%.

Tabela 5.33: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 55°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,199	2,712
8,2	14,875	5,326
5,3	15,341	3,537
9,5	14,674	4,917
8,3	14,860	3,432
10,5	14,522	2,815

A Tabela 5.33 apresenta os valores obtidos pelo modelo de Gomes *et al.* (2006) para a temperatura de 55°C, e para o caso do lenho final. Neste caso, os valores obtidos apresentam um erro médio de 3,79%, ligeiramente superior aos verificados para as temperaturas de 35 e 45°C. Os valores experimentais são, em média, 3,17% superiores aos valores obtidos pelo modelo de Gomes *et al.* (2006).

Tabela 5.34: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 55°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,574	3,032
8,2	15,219	3,938
5,3	15,696	2,799
9,5	15,013	3,192
8,3	15,203	1,924
10,5	14,857	1,862

No caso do lenho final, apresentado pela Tabela 5.34, verifica-se um ligeiro aumento no valor final de PCI, de aproximadamente 2,26%, em relação ao lenho inicial. No que diz respeito ao erro médio cometido pelo modelo de Gomes *et al.* (2006) para o lenho final, verifica-se uma diminuição de aproximadamente 26,35%. Os valores obtidos experimentalmente para o lenho final, e temperatura de 55°C, são superiores aos valores obtidos pelo modelo de Gomes *et al.* (2006).

As Tabelas 5.35 e 5.36 apresentam os valores obtidos através do modelo de Gomes *et al.* (2006), respectivamente para o lenho inicial e lenho final e para a temperatura de 65°C.

Tabela 5.35: Valor de PCI para o lenho inicial, temperatura de 65°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,4	16,181	2,851
7,6	14,970	3,879
4,5	15,474	5,004
5,7	15,276	3,761
6,5	15,146	3,501
7,2	15,034	2,233

No caso do lenho inicial, verifica-se um valor médio de PCI de 15,347 MJ/kg, e um erro médio de 3,54%. O valor máximo de PCI é verificado para o teor de água na amostra de 0,4%, com um valor de 16,181 MJ/kg. À medida que o teor de água aumenta na amostra, o valor final de PCI diminui. Comparativamente aos resultados experimentais constata-se que, os valores obtidos através do modelo de Gomes *et al.* (2006) são sempre inferiores.

Tabela 5.36: Valor de PCI para o lenho final, temperatura de 65°C, obtido pelo modelo de Gomes *et al.*

M_e (%)	PCI (MJ/kg)	Erro (%)
0,4	16,555	3,670
7,6	15,316	3,662
4,5	15,831	3,543
5,7	15,629	2,999
6,5	15,496	3,870
7,2	15,381	2,435

Quando analisado o lenho final, constata-se um valor médio de PCI de 15,701 MJ/kg, sendo superior ao obtido para o lenho inicial. O erro médio cometido pela expressão nos valores do lenho final ronda os 3,36%, sendo 4,95% inferior ao erro médio do lenho inicial. O valor máximo de PCI é verificado para o teor de água de 0,4%, e o mínimo para o teor de água máximo de 7,6%.

Pela análise anteriormente realizada, verifica-se que o modelo de Gomes *et al.* (2006) apresenta melhores resultados que o modelo de Gatto *et al.* (2003), visto que os erros apresentados são bastante inferiores.

Capítulo 6

Determinação da expressão para o PCI

No presente capítulo proceder-se-á à determinação da expressão de previsão do PCI. Desta forma, serão utilizados dois métodos distintos para determinar a expressão do PCI: o método de interpolação das diferenças divididas de Newton e o método de regressão linear. Posteriormente, será realizada uma comparação entre ambos os métodos e o modelo bibliográfico com melhor correlação, com o intuito de encontrar a expressão que melhor descreve a variação do PCI.

6.1. Determinação da expressão para o PCI

6.1.1. Obtenção através da interpolação das diferenças divididas de Newton de um modelo para o PCI

Ao longo deste subcapítulo pretende-se analisar os resultados obtidos experimentalmente e tentar encontrar uma expressão que descreva o poder calorífico em função do teor de humidade. Recorrendo ao método das diferenças divididas de Newton

pretende-se encontrar uma equação polinomial de forma a descrever as curvas de PCI para cada temperatura.

Dada uma função $f(x)$ conhecida em $n+1$ pontos $(x_i, f(x_i))$, $i = 0, 1, \dots, n$, o objectivo da interpolação polinomial consiste em determinar o polinómio de grau $\leq n$ (Conte & Boor),

$$p_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (6.1)$$

$$p_n(x_i) = f(x_i) = f_i, \forall i = 0, \dots, n. \quad (6.2)$$

O polinómio interpolador de Newton com diferenças divididas surge de uma construção recursiva, extremamente simples, a partir da definição de diferença dividida.

Chama-se diferença dividida de primeira ordem de $f(x)$, relativamente aos argumentos x_i, x_{i+1} , à seguinte quantidade:

$$f[x_i, x_{i+1}] = \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (6.3)$$

De um modo geral, a diferença dividida de ordem k ($k \geq 2$) de $f(x)$, relativamente aos argumentos $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}$, é a quantidade

$$f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] = \frac{f[x_{i+1}, x_{i+2}] - f[x_i, x_{i+1}]}{x_{i+2} - x_i} \quad (2^a \text{ Ordem}) \quad (6.4)$$

$$f[x_i, \dots, x_{i+k}] = \frac{f[x_{i+1}, \dots, x_{i+k}] - f[x_i, \dots, x_{i+k-1}]}{x_{i+k} - x_i} \quad (\text{Ordem } k) \quad (6.5)$$

O cálculo das diferenças divididas é dado pela Tabela 6.1

Tabela 6.1: Tabela de cálculo do polinómio das diferenças divididas de Newton.

x	f(x)	F [x_i, x_{i+1}]	F [x_i, x_{i+1}, x_{i+2}]	F [x_i, x_{i+1}, x_{i+3}]	...
x ₀	f ₀				
		f [x ₀ ,x ₁]			
x ₁	f ₁		f [x ₀ ,x ₁ ,x ₂]		
		f [x ₁ ,x ₂]		f [x ₀ ,x ₁ ,x ₂ , x ₃]	...
x ₂	f ₂		f [x ₁ ,x ₂ ,x ₃]	...	
		f [x ₂ ,x ₃]	...		
x ₃	f ₃	...			
...				

Das diferenças divididas vem que

$$f[x, x_0] = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \tag{6.6}$$

e

$$f[x, x_0, x_1] = \frac{f[x, x_0] - f[x_0, x_1]}{x - x_1} \tag{6.7}$$

Daqui resulta que:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f[x_0, x] \tag{6.8}$$

e

$$f[x, x_0] = f[x_0, x_1] + (x - x_1)f[x, x_0, x_1] \tag{6.9}$$

Então, substituindo (6.9) em (6.8), vem

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_0) + (x - x_0) f[x_0, x] \\ f(x) &= f(x_0) + (x - x_0) (f[x_0, x_1] + (x - x_1)f[x, x_0, x_1]) \\ f(x) &= f(x_0) + (x - x_0) f[x_0, x_1] + (x - x_0)(x - x_1)f[x, x_0, x_1] \end{aligned} \tag{6.10}$$

Deste modo, a equação de interpolação de Newton para as diferenças divididas é (Conte & Boor)

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f[x_0, x_1] + (x - x_0)(x - x_1)f[x_0, x_1, x_2] + \dots \quad (6.11)$$

$$+ (x - x_0)(x - x_1)(x - x_{n-1})f[x_0, \dots, x_n] + (x - x_0)(x - x_1)(x - x_n)f[x, x_0, \dots, x_n]$$

Nas Tabelas 6.2 e 6.3 são apresentadas todas as expressões calculadas pelo método de Newton, para o lenho inicial e final, para as diferentes temperaturas estudadas experimentalmente.

Tabela 6.2: Expressões de PCI através do método de Newton para o lenho inicial.

Temperatura	Lenho inicial
35°C	$PCI = -8,28 \times 10^{-4}x^5 + 2,40 \times 10^{-2}x^4 - 2,66 \times 10^{-1}x^3 + 1,372x^2 - 3,397x + 19,202$
45°C	$PCI = 3,73 \times 10^{-3}x^5 - 5,87 \times 10^{-2}x^4 + 2,42 \times 10^{-1}x^3 + 0,171x^2 - 2,440x + 18,999$
55°C	$PCI = -4,92 \times 10^{-2}x^5 + 1,66x^4 - 20,8x^3 + 115,014x^2 - 245,956x + 80,635$
65°C	$PCI = 2,95 \times 10^{-2}x^5 - 7,32 \times 10^{-1}x^4 + 6,817x^3 - 28,659x^2 + 48,889x + 1,268$

Tabela 6.3: Expressões de PCI através do método de Newton para o lenho final.

Temperatura	Lenho inicial
35°C	$PCI = -1,03 \times 10^{-3}x^5 + 2,50 \times 10^{-2}x^4 - 2,27 \times 10^{-1}x^3 + 0,973x^2 - 2,182x + 18,436$
45°C	$PCI = -1,03 \times 10^{-3}x^5 + 2,50 \times 10^{-2}x^4 - 2,27 \times 10^{-1}x^3 + 0,973x^2 - 2,182x + 18,436$
55°C	$PCI = -5,06 \times 10^{-2}x^5 + 1,711x^4 - 21,43x^3 + 118,537x^2 - 253,641x + 83,081$
65°C	$PCI = -4,32 \times 10^{-2}x^5 + 1,098x^4 - 10,498x^3 + 45,355x^2 - 79,750x + 42,474$

As expressões apresentadas anteriormente representam o valor de PCI para cada temperatura e teor de humidade no interior da amostra. No entanto, no Capítulo 4 constatou-se que o factor temperatura não influenciava significativamente o valor final do PCI. Deste modo, será obtida uma expressão para o PCI sem influência da temperatura.

As expressões obtidas através dos valores médios experimentais encontram-se apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Expressão genérica para o PCI.

Lenho Inicial	$PCI = -1,42 \times 10^{-3}x^5 + 3,64 \times 10^{-2}x^4 - 3,31 \times 10^{-1}x^3 + 1,286x^2 - 2,092x + 17,172$
Lenho Final	$PCI = -1,57 \times 10^{-3}x^5 + 4,06 \times 10^{-2}x^4 - 3,76 \times 10^{-1}x^3 + 1,518x^2 - 2,653x + 17,761$

Para validar as expressões obtidas numericamente foi necessário proceder à aplicação da variável teor de água. Os valores teóricos obtidos pelas expressões são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Valores teóricos de PCI (MJ/kg).

M_c (%)	Lenho Inicial	Lenho Final
0,3	16,651	17,092
3,0	16,135	16,220
5,3	15,700	15,832
7,2	15,570	15,760
8,2	15,911	16,156
10,5	15,030	15,234

Pela análise da Tabela 6.5 verifica-se que o lenho inicial apresenta um valor de PCI inferior ao apresentado pelo lenho final. Verifica-se também que, à medida que aumenta o teor de água no interior da amostra, o valor de PCI diminui.

De seguida serão analisados, pelas Tabelas 6.6 e 6.7, os erros inerentes às expressões de PCI para o lenho inicial e lenho final.

Tabela 6.6: Modelo matemático versus valores experimentais para o lenho inicial.

M_c (%)	PCI modelo matemático (MJ/kg)	PCI Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,651	16,651	0,000
3,0	16,135	16,135	0,000
5,3	15,712	15,712	0,000
7,2	15,574	15,574	0,000
8,2	15,904	15,904	0,000
10,5	14,942	14,942	0,000

Através da Tabela 6.6 pode verificar-se que as equações retiradas do método de Newton descrevem com rigor a variação o PCI em função do teor de humidade, visto que, o erro entre os valores experimentais e os valores modelados matematicamente são todos 0%. Resta ainda dizer, que o polinómio descreve com rigor nestes pontos, visto que foram utilizados para criar a função. Deste modo, e para o caso do lenho inicial, pode afirmar-se que a expressão retirada do método de Newton prevê com rigor a variação do PCI em função do teor de água na amostra.

Tabela 6.7: Modelo matemático versus valores experimentais para o lenho final.

M_c (%)	PCI modelo matemático (MJ/kg)	PCI Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	17,092	17,092	0,000
3,0	16,220	16,220	0,000
5,3	15,843	15,843	0,000
7,2	15,765	15,765	0,000
8,2	16,148	16,148	0,000
10,5	15,139	15,139	0,000

As equações do lenho inicial e do lenho final, retiradas do modelo de Newton, tiveram como base 6 pontos dos resultados experimentais. Deste modo, através do método interpolador das diferenças divididas de Newton obteve-se uma equação de 5º grau para cada lenho. Torna-se então importante, perceber o erro cometido pela expressão nos restantes pontos de teor de água utilizados ao longo do trabalho experimental. Nas Tabelas 6.8 e 6.9 são apresentadas comparações entre os valores experimentais e os valores modelados pela expressão de Newton.

Tabela 6.8: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água do lenho inicial.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,651	16,651	0,000
0,4	16,656	16,520	0,815
1,2	16,690	16,013	4,058
1,2	16,623	16,013	3,672
3,0	16,135	16,135	0,000
3,2	15,921	16,139	1,349
3,6	15,913	16,118	1,269
3,9	15,881	16,077	1,217
4,5	15,873	15,942	0,431
5,3	15,712	15,712	0,000
5,7	15,695	15,610	0,541
6,2	15,650	15,525	0,798
6,3	15,486	15,516	0,192
6,4	15,500	15,510	0,061
6,5	15,377	15,506	0,834
7,2	15,574	15,574	0,000
7,2	15,298	15,574	1,774
7,2	15,197	15,574	2,418
7,6	16,289	15,681	3,730
8,2	15,904	15,904	0,000
8,3	15,433	15,943	3,202
8,7	15,006	16,087	6,724
9,5	15,388	16,135	4,632
10,5	14,942	14,942	0,000

Analisando a Tabela 6.8 é possível verificar que a expressão obtida através do método de Newton, para o caso do lenho inicial, produz bons resultados para todos os valores de teor de água no interior da amostra. O erro máximo cometido pela expressão é de 6,724%, enquanto o erro médio é de aproximadamente 1,572%. Deste modo, pode concluir-se que a expressão apresenta uma boa correlação com os valores experimentais.

Tabela 6.9: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água do lenho final.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	17,092	17,092	0,000
0,4	17,186	16,920	1,549
1,2	16,875	16,194	4,036
1,2	17,073	16,194	5,152
3,0	16,220	16,220	0,000
3,2	16,239	16,227	0,076
3,6	16,208	16,213	0,029
3,9	16,086	16,179	0,574
4,5	16,413	16,056	2,173
5,3	15,843	15,843	0,000
5,7	16,112	15,750	2,247
6,2	15,751	15,678	0,460
6,3	15,578	15,672	0,598
6,4	15,700	15,669	0,202
6,5	16,120	15,669	2,799
7,2	15,765	15,765	0,000
7,2	15,491	15,765	1,738
7,2	15,358	15,765	2,584
7,6	15,898	15,892	0,035
8,2	16,148	16,148	0,000
8,3	15,508	16,193	4,230
8,7	15,113	16,357	7,607
9,5	15,502	16,422	5,601
10,5	15,139	15,139	0,000

A Tabela 6.9 apresenta os resultados de PCI, obtidos para a expressão do lenho final, para todos os valores de teor de água utilizados no trabalho experimental. Analisando a tabela anterior, constata-se que o erro médio cometido pela expressão é de 1,737%. Este erro é pouco significativo, indicando que a expressão descreve com rigor a variação do PCI em função do teor de água na amostra.

Seguidamente, será determinada uma equação geral do PCI sem distinção do lenho e da temperatura de acondicionamento da amostra. Desta forma, perceber-se-á a influência do lenho no valor final do PCI. A expressão genérica do PCI é a seguinte:

$$PCI = -2 \times 10^{-3}x^5 + 5,51 \times 10^{-2}x^4 - 5,48 \times 10^{-1}x^3 + 2,357x^2 - 4,074x + 17,896 \quad (6.12)$$

Tabela 6.10: Modelo matemático versus valores experimentais para os teores de água.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,871	16,871	0,000
0,4	16,921	16,609	1,843
1,2	16,782	15,562	7,273
1,2	16,848	15,562	7,635
3,0	16,061	16,061	0,000
3,2	16,080	16,137	0,351
3,6	16,178	16,245	0,415
3,9	15,983	16,283	1,839
4,5	16,351	16,248	0,632
5,3	16,026	16,026	0,000
5,7	15,992	15,882	0,687
6,2	15,700	15,716	0,102
6,3	15,532	15,688	0,994
6,4	15,600	15,663	0,397
6,5	15,908	15,640	1,685
7,2	15,571	15,571	0,000
7,2	15,394	15,571	1,134
7,2	15,278	15,571	1,885
7,6	15,736	15,614	0,776
8,2	15,778	15,778	0,000
8,3	15,445	15,813	2,330
8,7	15,059	15,957	5,626
9,5	15,470	16,081	3,797
10,5	15,041	15,041	0,000

Através da Tabela 6.10, constata-se que para os pontos utilizados na construção do polinómio, o erro entre os valores numéricos e os resultados experimentais é de 0%, tal como seria de esperar. O erro médio máximo cometido pela expressão é de 7,273%, enquanto o erro médio ronda os 1,6%. Assim, conclui-se que, com a utilização da Equação 6.12, no qual não existe distinção do lenho e da temperatura, o erro é pouco significativo.

Com o intuito de simplificar a equação de determinação numérica do valor de PCI em função do teor de água, utilizaram-se quatro pontos dos resultados experimentais para obter, pelo método das diferenças divididas, uma equação de 3º grau. Desta forma, as equações obtidas são apresentadas pela Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Expressão genérica para o PCI.

Lenho Inicial	$PCI = -1,47 \times 10^{-2}x^3 + 2,60 \times 10^{-1}x^2 - 1,398x + 18,02$
Lenho Final	$PCI = -1,67 \times 10^{-2}x^3 + 2,97 \times 10^{-1}x^2 - 1,581x + 18,374$

Seguidamente, serão apresentados os resultados obtidos pela aplicação da equação a todos os valores de teor de água aplicados no trabalho experimental. Desta forma, é possível verificar se a equação simplificada apresenta uma boa correlação com os resultados experimentais.

Tabela 6.12: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água do lenho inicial.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,651	17,623	5,516
0,4	16,656	17,501	4,828
1,2	16,690	16,690	0,000
1,2	16,623	16,690	0,400
3,0	16,135	15,764	2,301
3,2	15,921	15,721	1,256
3,6	15,913	15,664	1,567
3,9	15,881	15,642	1,504
4,5	15,873	15,644	1,441
5,3	15,712	15,712	0,000
5,7	15,695	15,761	0,419
6,2	15,650	15,826	1,108
6,3	15,486	15,838	2,221
6,4	15,500	15,850	2,207
6,5	15,377	15,862	3,055
7,2	15,574	15,923	2,190
7,2	15,298	15,923	3,925
7,2	15,197	15,923	4,555
7,6	16,289	15,934	2,179
8,2	15,904	15,904	0,000
8,3	15,433	15,892	2,891
8,7	15,006	15,824	5,170
9,5	15,388	15,562	1,116
10,5	14,942	14,942	0,000

Analisando a Tabela 6.12 pode constatar-se que o erro médio cometido pela expressão simplificada de 3º grau é de 2,1%. O erro máximo cometido ronda os 5,5%, enquanto o valor mínimo é de 0%. Deste modo, pode concluir-se que a expressão

simplificada para o lenho inicial, representa a variação do PCI em função do teor de água na amostra com bastante precisão.

Tabela 6.13: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água do lenho final.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	17,092	17,926	4,651
0,4	17,186	17,788	3,383
1,2	16,875	16,875	0,000
1,2	17,073	16,875	1,161
3,0	16,220	15,851	2,276
3,2	16,239	15,806	2,666
3,6	16,208	15,749	2,835
3,9	16,086	15,731	2,206
4,5	16,413	15,746	4,062
5,3	15,843	15,843	0,000
5,7	16,112	15,909	1,258
6,2	15,751	15,996	1,537
6,3	15,578	16,013	2,717
6,4	15,700	16,030	2,056
6,5	16,120	16,046	0,459
7,2	15,765	16,137	2,303
7,2	15,491	16,137	4,001
7,2	15,358	16,137	4,828
7,6	15,898	16,162	1,635
8,2	16,148	16,148	0,000
8,3	15,508	16,138	3,905
8,7	15,113	16,074	5,981
9,5	15,502	15,805	1,917
10,5	15,139	15,139	0,000

Para o caso do lenho final, apresentado pela Tabela 6.13, pode verificar-se que o erro máximo apresentado é de 5,981%, enquanto que o valor mínimo é de 0%. Desta forma, pode afirmar-se que a expressão para o lenho final descreve com bastante precisão a variação do PCI em função do teor de água na amostra. O erro médio cometido pela expressão simplificada de 3º grau é de 2,327%.

Visto que a expressão simplificada de 3º grau apresenta uma boa correlação com os valores experimentais, resta ainda realizar uma expressão sem distinção do lenho e sem distinção da temperatura.

A equação simplificada de 3º grau obtida através da interpolação das diferenças divididas de Newton é dada pela seguinte expressão:

$$PCI = -5,47 \times 10^{-3}x^3 + 8,60 \times 10^{-2}x^2 - 4,88 \times 10^{-1}x + 17,01 \quad (6.13)$$

Tabela 6.14: Expressão de 3º grau versus valores experimentais para os teores de água, sem distinção do lenho.

M_c (%)	PCI Experimentais (MJ/kg)	PCI Modelo Matemático (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,871	16,871	0,000
0,4	16,921	16,828	0,549
1,2	16,782	16,539	1,450
1,2	16,848	16,539	1,836
3,0	16,061	16,173	0,690
3,2	16,080	16,150	0,434
3,6	16,178	16,113	0,402
3,9	15,983	16,091	0,671
4,5	16,351	16,058	1,793
5,3	16,026	16,026	0,000
5,7	15,992	16,011	0,117
6,2	15,700	15,988	1,802
6,3	15,532	15,983	2,820
6,4	15,600	15,977	2,360
6,5	15,908	15,971	0,394
7,2	15,571	15,915	2,162
7,2	15,394	15,915	3,274
7,2	15,278	15,915	4,003
7,6	15,736	15,870	0,843
8,2	15,778	15,778	0,000
8,3	15,445	15,760	1,996
8,7	15,059	15,675	3,931
9,5	15,470	15,450	0,129
10,5	15,041	15,041	0,000

Na Tabela 6.14, são comparados os valores experimentais com os valores obtidos pela expressão de 3º grau. A Equação 6.13 foi modelada sem distinção do lenho e da temperatura. Desta forma, a comparação é feita com a média dos valores experimentais de ambos os lenhos. Ao analisar a Tabela 6.14, constata-se que o erro máximo cometido pela Equação 6.13 é de 4,003%, enquanto o erro mínimo é de 0%. No entanto, o erro médio é de aproximadamente de 1,32%. Assim sendo, pode concluir-se que ao utilizar a Expressão 6.13, para prever a variação do PCI em função do teor de água na amostra, o erro cometido é pouco significativo.

6.2. Regressão linear

Através dos pontos obtidos experimentalmente é possível retirar as equações das rectas para as quais tendem os resultados. Ao longo do trabalho foram estudadas quatro temperaturas. Desse modo a apresentação e análise das curvas serão feitas separadamente. Inicialmente, serão analisadas as temperaturas de 35°C e 45°C. Posteriormente proceder-se-á à análise das temperaturas de 55°C e 65°C.

Com base nos resultados experimentais expostos nas Figuras 6.1 e 6.2 para as temperaturas de 35°C e 45°C, foi possível obter os modelos, descritos pelas Equações 6.14 e 6.15, que descrevem a variação do PCI em função do teor de humidade.

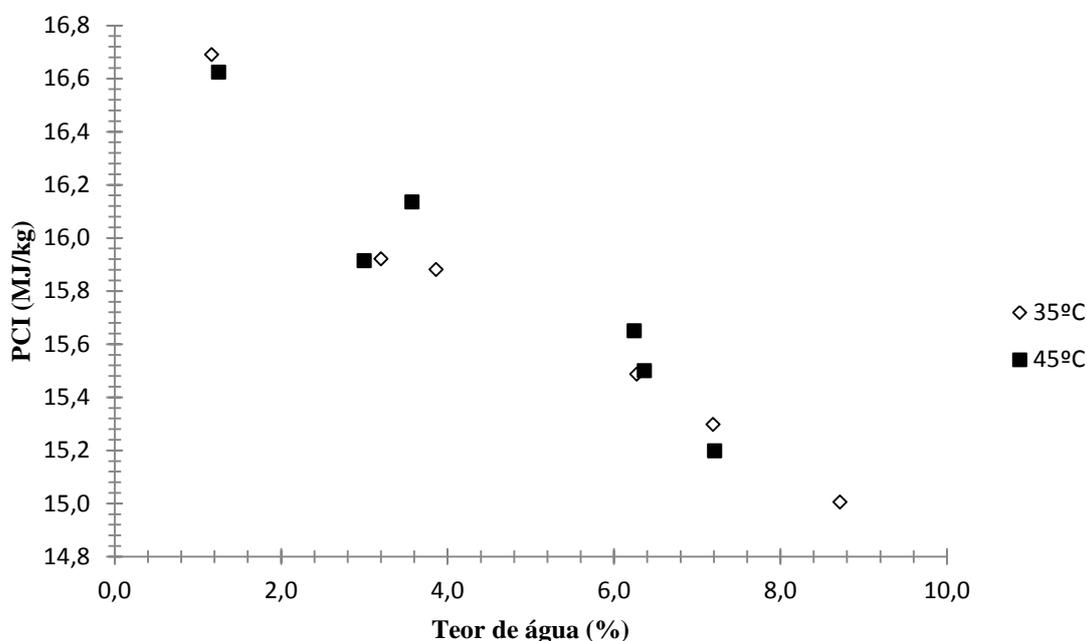


Figura 6.1: Curvas experimentais do PCI para o lenho inicial, temperatura de 35°C e 45°C.

A Equação 6.14 exprime a função para determinação do PCI do lenho inicial para a temperatura de 35°C, e a Equação 6.15 define o PCI do lenho inicial para a temperatura de 45°C.

$$PCI = -0,2063W + 16,76 \quad R^2 = 0,9596 \quad (6.14)$$

$$PCI = -0,205W + 16,781 \quad R^2 = 0,9093 \quad (6.15)$$

A Equação 6.14, para a temperatura de 35°C, apresenta um valor para R^2 de 0,9596, indicando que esta função descreve satisfatoriamente os valores de PCI em função do teor de humidade. No caso da Equação 6.15, correspondente à temperatura de 45°C, observa-se um valor para R^2 de 0,9053, indicando que existe uma ligeira discrepância entre os valores experimentais e os valores obtidos pela expressão, quando comparados com os obtidos para a temperatura de 35°C.

Na Figura 6.2 estão representados os resultados experimentais do lenho final para as temperaturas de 35°C e 45°C.

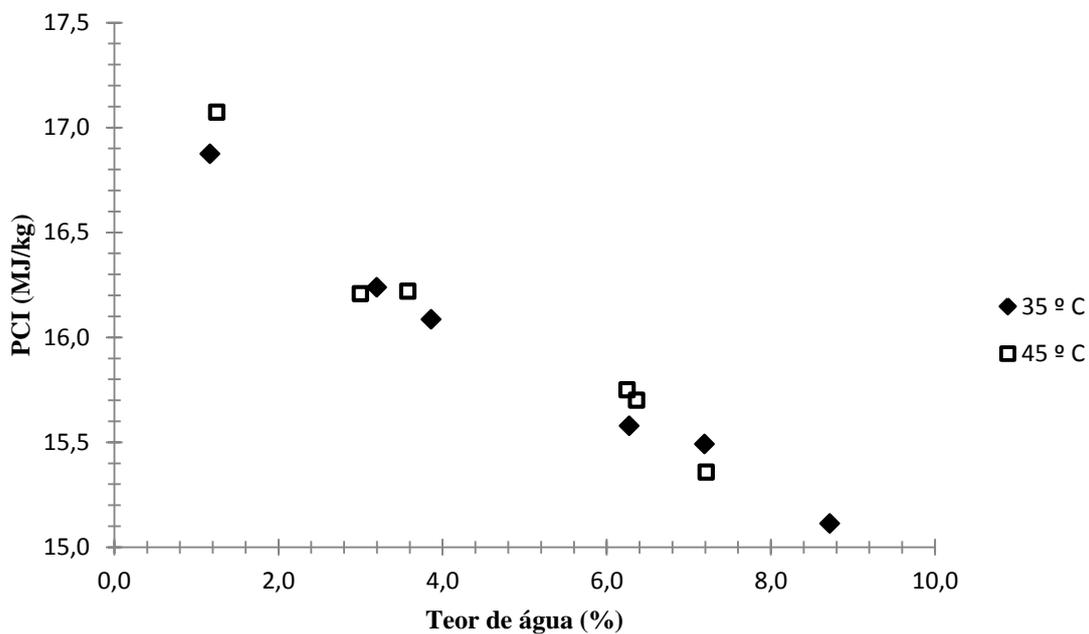


Figura 6.2: Curvas experimentais de PCI para o lenho final, temperatura de 35°C e 45°C.

Através da Figura 6.2 foi possível obter as equações do PCI para o lenho final, correspondente às temperaturas de 35°C (Equação 6.16) e 45°C (Equação 6.17).

$$PCI = -0,2228W + 17,026 \quad R^2 = 0,9841 \quad (6.16)$$

$$PCI = -0,2464W + 17,187 \quad R^2 = 0,9316 \quad (6.17)$$

Ao analisar a Figura 6.2, é de notar que tanto a curva de 35°C como a de 45°C apresentam um padrão de resultados bastante próximos. A curva de 35°C apresenta um R^2 de 0,9841, enquanto que a curva de 45°C apresenta um valor para R^2 de 0,9316. Ambas as expressões representam satisfatoriamente a variação do PCI em função do teor de água na amostra.

Nas Tabelas 6.15 e 6.16 são apresentadas as correlações entre os valores obtidos numericamente e os valores experimentais para a temperatura de 35°C.

Tabela 6.15: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 35°C.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,519	16,690	1,024
3,2	16,100	15,921	1,109
3,9	15,963	15,881	0,514
6,3	15,465	15,486	0,135
7,2	15,276	15,298	0,141
8,7	14,961	15,006	0,294

Observando a Tabela 6.15 verifica-se que o erro máximo cometido utilizando a expressão obtida por regressão linear é de aproximadamente de 1,1%. É de salientar que o erro médio da equação em relação aos resultados experimentais é de 0,536%

Tabela 6.16: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 35 ° C.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,766	16,875	0,646
3,2	16,313	16,239	0,453
3,9	16,166	16,086	0,494
6,3	15,628	15,578	0,316
7,2	15,423	15,491	0,437
8,7	15,084	15,113	0,191

Com a utilização da expressão para a qual tendem os resultados do lenho final e da temperatura de 35°C, pode cometer-se um erro máximo de aproximadamente 0,65%. Contudo, o erro médio da expressão é de 0,773%.

No caso da temperatura de 45°C, as Tabelas 6.17 e 6.18 apresentam o erro proveniente do método de regressão linear e dos valores experimentais.

Tabela 6.17: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 45°C.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,525	16,623	0,591
3,6	16,048	16,135	0,540
3,0	16,166	15,913	1,565
6,2	15,501	15,650	0,956
6,4	15,476	15,500	0,155
7,2	15,303	15,197	0,687

Para a temperatura de 45°C e no caso do lenho inicial, o erro médio apresentado pela expressão, em relação aos resultados experimentais é de aproximadamente 0,75%. Este erro é relativamente baixo, e quando comparado ao obtido para a temperatura de 35°C verifica-se um crescimento de 28%. O erro máximo ronda os 1,6%, enquanto que o erro mínimo é de 0,16%.

Tabela 6.18: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 45°C.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
1,2	16,879	17,073	1,136
3,6	16,306	16,220	0,529
3,0	16,448	16,208	1,458
6,2	15,648	15,751	0,652
6,4	15,619	15,700	0,521
7,2	15,410	15,358	0,339

Realizando uma breve análise à Tabela 6.18 verifica-se que, utilizando o modelo de regressão linear é cometido um erro máximo de sensivelmente 1,46%. Este erro é pouco significativo, porém, em relação à temperatura de 35°C sofre um aumento de 0,81%.

Seguidamente proceder-se-á à análise dos valores obtidos para as temperaturas de 55°C e de 65°C para ambos os lenhos. Nas Figuras 6.3 e 6.4 é possível retirar graficamente as equações das rectas para as quais tendem os valores experimentais do lenho inicial e lenho final.

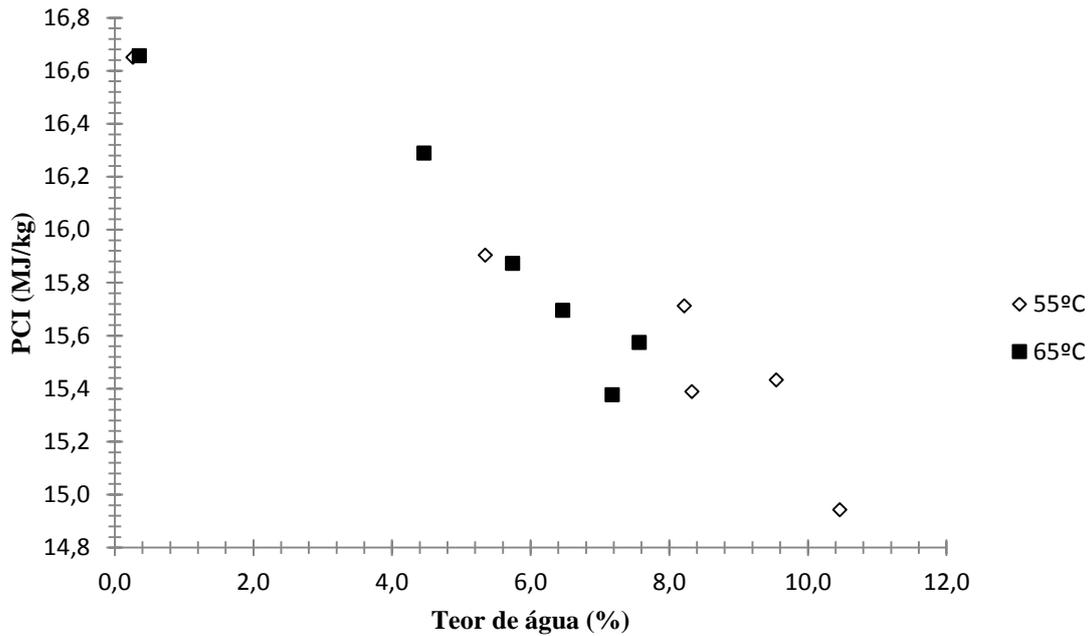


Figura 6.3: Curvas experimentais do PCI para o lenho inicial, temperatura de 55°C e 65°C.

A Equação 6.18 representa a expressão do PCI para a temperatura de 55°C, enquanto o PCI para a temperatura de 65°C é representado pela Equação 6.19, ambas para o lenho inicial.

$$PCI = -0,1495W + 16,722 \quad R^2 = 0,9272 \quad (6.18)$$

$$PCI = -0,1707W + 16,814 \quad R^2 = 0,8999 \quad (6.19)$$

A expressão obtida para a temperatura de 65°C apresenta um valor para R^2 de 0,8999, demonstrando que a recta para a qual tendem os resultados experimentais oferece uma confiança satisfatória na representação da variação do PCI em função do teor de humidade. No caso da temperatura de 55°C, o valor de R^2 é de 0,9272 sendo mais favorável ao apresentando para a temperatura de 65°C. Este valor representa a boa concordância da representação da variação do PCI em função do teor de água.

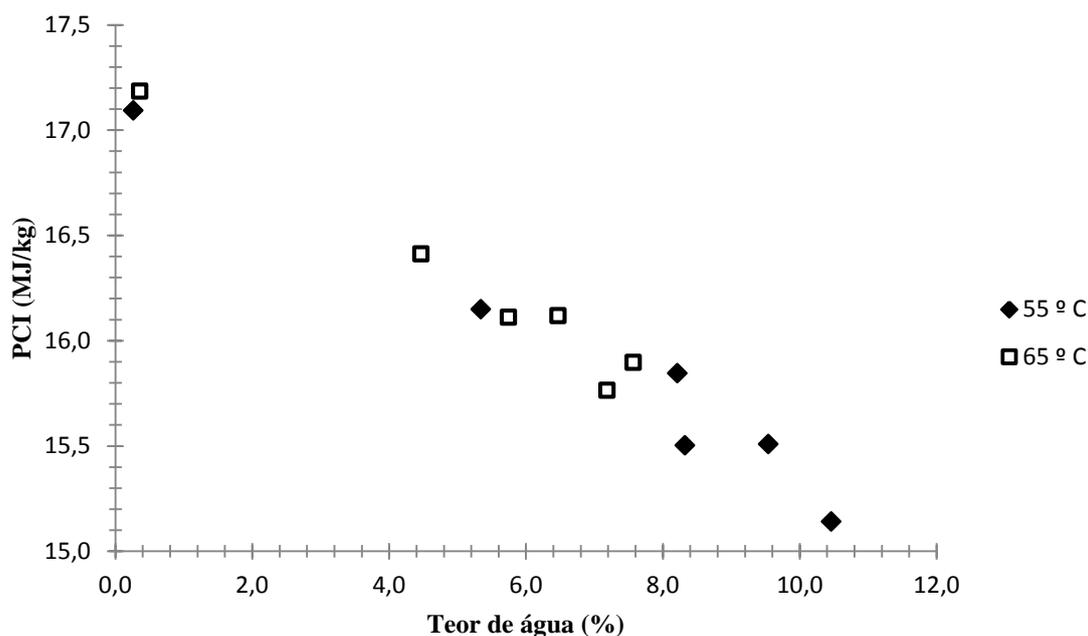


Figura 6.4: Curvas experimentais do PCI para o lenho final, temperatura de 55°C e 65°C.

A Figura 6.4 tem representado, para o lenho final, os resultados experimentais, dos quais foi possível retirar as equações do PCI, Equações 6.20 e 6.21, para as temperaturas de 55°C e 65°C, respectivamente.

$$PCI = -0,1814W + 17,146 \quad R^2 = 0,9685 \quad (6.20)$$

$$PCI = -0,189W + 17,25 \quad R^2 = 0,9739 \quad (6.21)$$

Quanto aos valores do PCI para o lenho final, representados na Figura 6.4, é possível verificar que, para o caso da temperatura de 55°C, existe uma ligeira melhoria para o valor de R^2 em relação ao obtido para o lenho inicial. Este valor é de 0,9685, traduzindo que a equação representará com precisão a variação do PCI em função do teor de água na amostra. Quanto à temperatura de 65°C é visível uma melhoria de R^2 em relação à temperatura de 55°C. Assim, pode concluir-se que as equações obtidas pelo método da regressão linear, representam com precisão a variação do PCI em função do teor de água no interior da amostra.

Nas tabelas seguintes serão comparados os erros cometidos pelas equações comparativamente aos resultados experimentais.

Tabela 6.19: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 55°C.

M_e (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,683	16,651	0,191
8,2	15,493	15,712	1,394
5,3	15,923	15,904	0,120
9,5	15,295	15,433	0,892
8,3	15,477	15,388	0,575
10,5	15,158	14,942	1,421

Ao analisar a Tabela 6.19 é possível verificar que o erro máximo cometido pela Equação 6.18 é de aproximadamente 1,421%, enquanto que o erro médio da expressão é de 0,766%. Os erros apresentados são pequenos, indicando que a Equação 6.18 descreve com rigor a variação do PCI em função do teor de água.

Tabela 6.20: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 55°C.

M_e (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	17,098	17,092	0,037
8,2	15,655	15,843	1,187
5,3	16,176	16,148	0,176
9,5	15,415	15,508	0,604
8,3	15,635	15,502	0,856
10,5	15,248	15,139	0,713

No que diz respeito ao lenho final, e analisando a Tabela 6.20, constata-se que o erro máximo é de 1,187%, existindo uma diminuição de 0,817% em relação ao verificado para o lenho inicial. O erro médio da expressão é de 0,595%, sendo 0,170% superior ao erro cometido para o lenho final nas restantes temperaturas.

As Tabelas 6.21 e 6.22 correspondem à análise do lenho inicial e final para a temperatura de 65°C.

Tabela 6.21: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho inicial e 65°C.

M_e (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,4	16,753	16,656	0,580
7,6	15,522	15,574	0,333
4,5	16,052	16,289	1,454
5,7	15,834	15,873	0,242
6,5	15,710	15,695	0,095
7,2	15,588	15,377	1,356

Analisando a Tabela 6.21 depreende-se que o erro máximo é de 1,454%, enquanto o erro mínimo é de 0,095%. O erro médio da Expressão 6.19 é de aproximadamente 0,677%, sendo inferior ao erro obtido para a temperatura de 55°C.

Tabela 6.22: Erro entre valores teóricos e experimentais para o lenho final e 65°C.

M_e (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,4	17,183	17,186	0,019
7,6	15,820	15,898	0,493
4,5	16,406	16,413	0,041
5,7	16,165	16,112	0,328
6,5	16,028	16,120	0,570
7,2	15,893	15,765	0,805

A Tabela 6.22 apresenta a comparação dos valores obtidos experimentalmente com os obtidos através da regressão linear para a qual tende a curva experimental. Deste modo, verifica-se que existe um erro máximo de 0,805%, e um valor mínimo de 0,019. O erro médio cometido pela expressão é de 0,376%, sendo o erro médio mais baixo cometido entre as todas as expressões.

Visto que existe uma diferença pouco significativa com o aumento da temperatura, e que no Capítulo 4 já foi demonstrado que o factor temperatura não influencia significativamente o valor final do PCI, será realizada uma análise sem distinção da temperatura.

Assim sendo, a Figura 6.5 apresenta graficamente esses mesmos valores, para assim, serem analisados e discutidos.

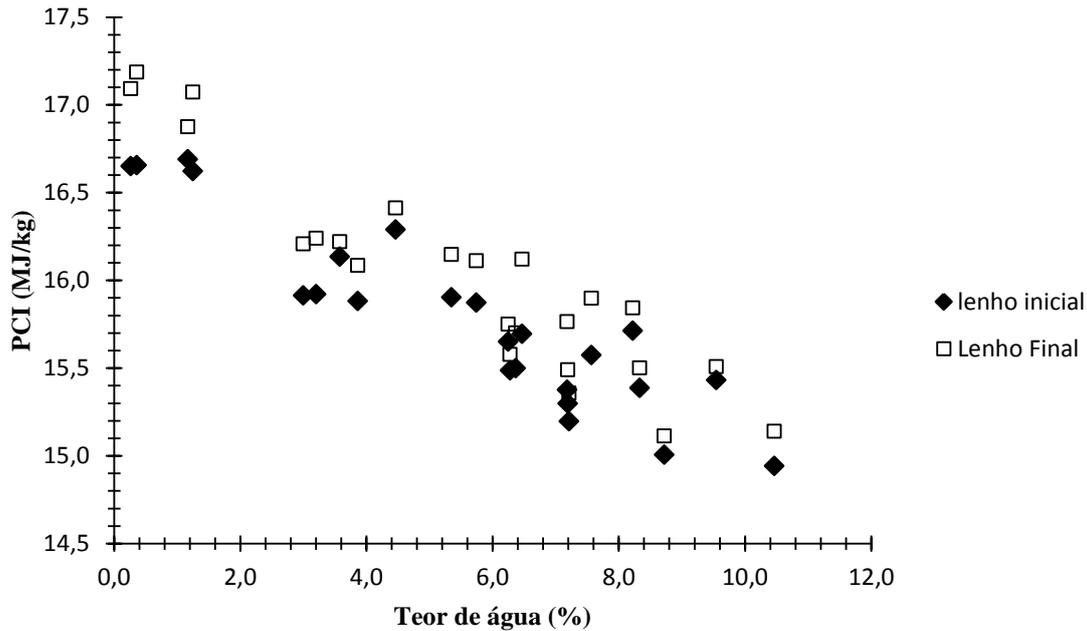


Figura 6.5: Valores médios de PCI para o lenho inicial e lenho final.

Na Figura 6.5 estão representados os resultados experimentais sem distinção das temperaturas do PCI, dos quais foi possível retirar as Equações 6.22 e 6.23, para o lenho inicial e final, respectivamente.

$$PCI = -0,164W + 16,685 \quad R^2 = 0,8526 \quad (6.22)$$

$$PCI = -0,1893W + 17,059 \quad R^2 = 0,8622 \quad (6.23)$$

Através da Figura 6.5 verifica-se que a equação da recta para o lenho inicial, para os quais tendem os valores experimentais, apresenta um R^2 de 0,8526. Este valor de R^2 baixou comparativamente com os valores de R^2 obtidos anteriormente em função de cada temperatura. No caso do lenho final, observa-se um R^2 de 0,8622. Apesar dos valores de R^2 serem ligeiramente inferiores aos obtidos em função da temperatura, só após a análise do erro é que se pode avaliar as expressões acima apresentadas.

Para perceber qual o erro obtido, sem a distinção da temperatura, em relação aos valores experimentais, é apresentado de seguida duas tabelas com os valores experimentais, teóricos e consecutivamente o erro obtido.

Tabela 6.23: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI para o lenho inicial.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,651	16,642	0,054
0,4	16,656	16,627	0,177
1,2	16,690	16,493	1,177
1,2	16,623	16,480	0,860
3,0	15,913	16,193	1,728
3,2	15,921	16,160	1,478
3,6	16,135	16,099	0,226
3,9	15,881	16,052	1,061
4,5	16,289	15,953	2,063
5,3	15,904	15,808	0,599
5,7	15,873	15,744	0,813
6,2	15,650	15,661	0,067
6,3	15,486	15,656	1,083
6,4	15,500	15,641	0,902
6,5	15,695	15,625	0,451
7,2	15,377	15,507	0,841
7,2	15,298	15,505	1,339
7,2	15,197	15,502	1,966
7,6	15,574	15,444	0,835
8,2	15,712	15,337	2,387
8,3	15,388	15,319	0,447
8,7	15,006	15,255	1,636
9,5	15,433	15,120	2,029
10,5	14,942	14,969	0,179

Ao analisar a tabela anterior depreende-se que o erro máximo é de aproximadamente 2,387%, indicando que a expressão utilizada para o lenho inicial descreve satisfatoriamente o valor do PCI em função do teor de humidade. Ao utilizar esta expressão, o erro médio cometido é de 1,017%. Quando comparado com o erro cometido pelas expressões em função da temperatura, verifica-se uma diferença no erro médio de aproximadamente 0,335%. Deste modo, pode confirmar-se que o factor temperatura não influencia de forma significativa o PCI.

Tabela 6.24: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI para o lenho final.

M_e (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	17,092	17,009	0,484
0,4	17,186	16,992	1,131
1,2	16,875	16,838	0,218
1,2	17,073	16,823	1,468
3,0	16,208	16,491	1,716
3,2	16,239	16,453	1,302
3,6	16,220	16,382	0,991
3,9	16,086	16,328	1,484
4,5	16,413	16,214	1,212
5,3	16,148	16,047	0,624
5,7	16,112	15,972	0,867
6,2	15,751	15,877	0,794
6,3	15,578	15,871	1,844
6,4	15,700	15,854	0,969
6,5	16,120	15,835	1,767
7,2	15,765	15,700	0,414
7,2	15,491	15,697	1,314
7,2	15,358	15,694	2,142
7,6	15,898	15,627	1,709
8,2	15,843	15,503	2,146
8,3	15,502	15,483	0,123
8,7	15,113	15,409	1,922
9,5	15,508	15,252	1,651
10,5	15,139	15,078	0,403

No caso do lenho final, o erro máximo cometido pela utilização da regressão linear dos valores experimentais, é de sensivelmente de 2,146%. O erro médio desta expressão é de 1,196%, e comparativamente à média do erro obtido pelas expressões em função da temperatura, verifica-se uma diferença de 0,654%.

Após a análise das tabelas anteriores é possível retirar uma conclusão importante. O factor temperatura, à qual as amostras foram sujeitas, não influencia significativamente o valor final do poder calorífico.

Por último, torna-se importante realizar a média de valores entre o lenho inicial e final, e retirar uma expressão genérica para o PCI. A Figura 6.6 representa os valores médios, bem como a expressão para a qual tendem os valores experimentais.

Através dos valores experimentais, foi possível obter um modelo, com R^2 de 0,8662, descrito pela Equação 6.24. Para melhor interpretar a equação obtida através da Figura 6.6, na Tabela 6.25 é apresentada uma comparação entre os valores experimentais e os valores obtidos pelo método da regressão linear (Figura 6.6).

$$PCI = -0,1767W + 16,872 \quad R^2 = 0,8662 \quad (6.24)$$

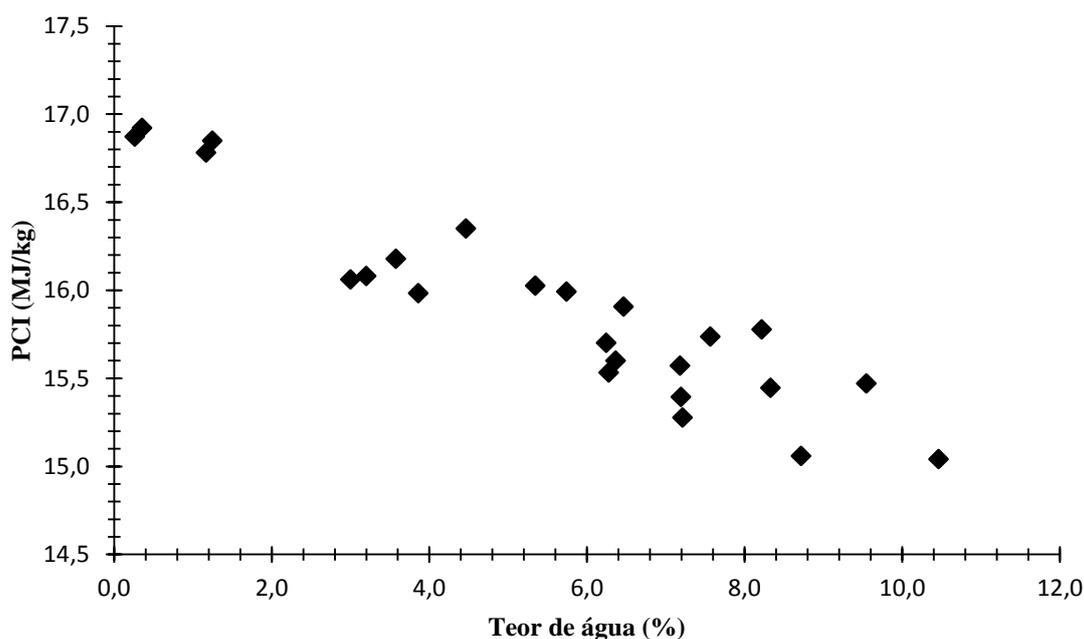


Figura 6.6: Valores médios de PCI

Analisando a Tabela 6.25 verifica-se que o erro máximo apresentado pela expressão é de 2,269% e o mínimo de 0,117%. O erro médio cometido pela expressão de PCI sem distinção do lenho e da temperatura é de 1,073%. Este erro não é significativo, demonstrando que a Equação 6.24 descreve com precisão a variação do PCI em função do teor de água no interior da amostra.

Tabela 6.25: Erro entre valores médios teóricos e experimentais de PCI.

M_c (%)	Regressão linear (MJ/kg)	Experimentais (MJ/kg)	Erro (%)
0,3	16,871	16,825	0,272
0,4	16,921	16,809	0,661
1,2	16,782	16,666	0,695
1,2	16,848	16,651	1,169
3,0	16,061	16,342	1,721
3,2	16,080	16,307	1,388
3,6	16,178	16,240	0,386
3,9	15,983	16,190	1,273
4,5	16,351	16,083	1,637
5,3	16,026	15,928	0,614
5,7	15,992	15,858	0,842
6,2	15,700	15,768	0,431
6,3	15,532	15,763	1,464
6,4	15,600	15,747	0,934
6,5	15,908	15,729	1,120
7,2	15,571	15,603	0,207
7,2	15,394	15,601	1,325
7,2	15,278	15,598	2,052
7,6	15,736	15,535	1,279
8,2	15,778	15,420	2,269
8,3	15,445	15,400	0,287
8,7	15,059	15,332	1,777
9,5	15,470	15,185	1,842
10,5	15,041	15,023	0,117

6.3. Comparação dos métodos de modelação

6.3.1. Comparação dos modelos experimentais

Apresenta-se de seguida uma comparação entre os métodos de determinação do PCI analisados anteriormente, com o intuito de determinar qual o método que produz melhor concordância com os valores experimentais.

Assim sendo, as Tabelas 6.26 e 6.27, expõem um resumo dos resultados obtidos anteriormente, de modo a serem analisados e discutidos.

Tabela 6.26: Comparação dos erros cometidos pelos métodos de determinação do PCI para o lenho inicial.

M_c (%)	Modelo matemático 5º Grau (%)	Modelo matemático 3º Grau (%)	Regressão linear (%)
0,3	0,000	5,516	0,054
0,4	0,815	4,828	0,177
1,2	4,058	0,000	1,177
1,2	3,672	0,400	0,860
3,0	0,000	2,301	1,728
3,2	1,349	1,256	1,478
3,6	1,269	1,567	0,226
3,9	1,217	1,504	1,061
4,5	0,431	1,441	2,063
5,3	0,000	0,000	0,599
5,7	0,541	0,419	0,813
6,2	0,798	1,108	0,067
6,3	0,192	2,221	1,083
6,4	0,061	2,207	0,902
6,5	0,834	3,055	0,451
7,2	0,000	2,190	0,841
7,2	1,774	3,925	1,339
7,2	2,418	4,555	1,966
7,6	3,730	2,179	0,835
8,2	0,000	0,000	2,387
8,3	3,202	2,891	0,447
8,7	6,724	5,170	1,636
9,5	4,632	1,116	2,029
10,5	0,000	0,000	0,179

Analisando a Tabela 6.26 verifica-se que o erro médio cometido pela expressão obtida por regressão linear é 1,017%, sendo inferior ao obtido pelo modelo matemático de 5º e 3º grau. O erro máximo é verificado para a equação de 3º grau, seguindo-se a expressão de 5º grau. Deste modo, para o lenho inicial, a expressão que melhor descreve a variação do PCI, em função do teor de humidade, é obtida através da equação obtida por regressão linear.

Seguidamente, será analisada através da Tabela 6.27, os erros cometidos por cada expressão determinada anteriormente para o lenho final.

Tabela 6.27: Comparação dos erros cometidos pelos métodos de determinação do PCI para o lenho final.

M_c (%)	Modelo matemático 5º Grau (%)	Modelo matemático 3º Grau (%)	Regressão linear (%)
0,3	0,000	4,651	0,484
0,4	1,549	3,383	1,131
1,2	4,036	0,000	0,218
1,2	5,152	1,161	1,468
3,0	0,000	2,276	1,716
3,2	0,076	2,666	1,302
3,6	0,029	2,835	0,991
3,9	0,574	2,206	1,484
4,5	2,173	4,062	1,212
5,3	0,000	0,000	0,624
5,7	2,247	1,258	0,867
6,2	0,460	1,537	0,794
6,3	0,598	2,717	1,844
6,4	0,202	2,056	0,969
6,5	2,799	0,459	1,767
7,2	0,000	2,303	0,414
7,2	1,738	4,001	1,314
7,2	2,584	4,828	2,142
7,6	0,035	1,635	1,709
8,2	0,000	0,000	2,146
8,3	4,230	3,905	0,123
8,7	7,607	5,981	1,922
9,5	5,601	1,917	1,651
10,5	0,000	0,000	0,403

Observando a Tabela 6.27, verifica-se que o erro máximo apresentado pela expressão de 5º grau é de 4,203%, enquanto a expressão de 3º grau apresenta um valor de 5,981%. A expressão obtida por regressão linear apresenta um erro máximo de 2,142% e um erro médio de 1,196%, apresentando uma redução de 25,34% em relação ao modelo matemático de grau 3. Os erros apresentados pelas expressões são pouco significativos. No entanto, a expressão que apresenta melhor correlação de valores é a obtida através de regressão linear.

Após a comparação dos modelos sem distinção da temperatura, interessa comparar os modelos apresentados anteriormente sem distinção do lenho. Desta forma, pode obter-se uma expressão genérica para o cálculo do PCI em função do teor de humidade.

Tabela 6.28: Comparação dos erros cometidos pelas expressões de PCI sem distinção do lenho.

M_e (%)	Modelo matemático 5º Grau (%)	Modelo matemático 3º Grau (%)	Regressão linear (%)
0,3	0,000	0,000	0,272
0,4	1,843	0,549	0,661
1,2	7,273	1,450	0,695
1,2	7,635	1,836	1,169
3,0	0,000	0,690	1,721
3,2	0,351	0,434	1,388
3,6	0,415	0,402	0,386
3,9	1,839	0,671	1,273
4,5	0,632	1,793	1,637
5,3	0,000	0,000	0,614
5,7	0,687	0,117	0,842
6,2	0,102	1,802	0,431
6,3	0,994	2,820	1,464
6,4	0,397	2,360	0,934
6,5	1,685	0,394	1,120
7,2	0,000	2,162	0,207
7,2	1,134	3,274	1,325
7,2	1,885	4,003	2,052
7,6	0,776	0,843	1,279
8,2	0,000	0,000	2,269
8,3	2,330	1,996	0,287
8,7	5,626	3,931	1,777
9,5	3,797	0,129	1,842
10,5	0,000	0,000	0,117

Analisando a Tabela 6.28, constata-se que o erro médio cometido pela expressão da regressão linear é de 1,073%, seguida do modelo matemático de 3º grau, com 1,319%, e pela expressão de 5º grau, com 1,642%. O erro máximo é verificado na expressão de grau 5, com 7,635%, seguido da expressão de 3º grau, com 3,931%. Deste modo, conclui-se que, a equação que melhor descreve a variação do PCI em função do teor de água, sem distinção do lenho, é a Equação 6.24, retirada do método de regressão linear, seguida da equação de 3º grau, obtida pelo método interpolador de Newton.

6.3.2. Comparação entre o modelo de regressão linear com os modelos teóricos

Neste subcapítulo serão comparados os modelos teóricos de PCI em função do teor de humidade (Capítulo 5) com o modelo obtido por regressão linear. Nesta comparação, será apenas incluída a classe de modelos que apresentam melhores resultados.

Os modelos de PCI em função da composição química não serão inseridos nesta confrontação, visto que se pretende encontrar um modelo que descreva a variação de PCI em função do teor de humidade com algum rigor. O modelo que melhores resultados obteve no Capítulo 5, foi o modelo utilizado pela Associação dos Engenheiros Alemães. Este modelo não permite distinguir os lenhos, portanto apenas será confrontado com o modelo de regressão linear sem distinção do lenho. O modelo de Gomes *et al.* (2006) é o modelo, que permite distinguir o lenho inicial do lenho final, e obteve melhores resultados. Assim sendo, será realizada uma comparação inicial do modelo Gomes *et al.* (2006) com o modelo obtido pela regressão linear. Posteriormente, realizar-se-á uma confrontação entre o modelo utilizado pela Associação dos Engenheiros Alemães com o modelo genérico obtido por regressão linear.

Analisando ao nível do lenho, as tabelas 6.29 e 6.30 apresentam os valores de PCI em função do teor de água para ambos os lenhos.

Tabela 6.29: Comparação dos erros apresentados pelos modelos para o lenho inicial (%).

M_e (%)	Experimental	Gomes <i>et al.</i> (2006)	Erro	Regressão linear	Erro
0,3	16,651	16,199	2,712	16,642	0,054
0,4	16,656	16,181	2,851	16,627	0,177
1,2	16,690	16,039	3,898	16,493	1,177
1,2	16,623	16,039	3,512	16,480	0,860
3,0	15,913	15,727	1,171	16,193	1,728
3,2	15,921	15,693	1,435	16,160	1,478
3,6	16,135	15,625	3,162	16,099	0,226
3,9	15,881	15,574	1,933	16,052	1,061
4,5	16,289	15,474	5,004	15,953	2,063
5,3	15,904	15,341	3,537	15,808	0,599
5,7	15,873	15,276	3,761	15,744	0,813
6,2	15,650	15,194	2,913	15,661	0,067
6,3	15,486	15,178	1,989	15,656	1,083
6,4	15,500	15,162	2,182	15,641	0,902
6,5	15,695	15,146	3,501	15,625	0,451
7,2	15,377	15,034	2,233	15,507	0,841
7,2	15,298	15,034	1,726	15,505	1,339
7,2	15,197	15,034	1,078	15,502	1,966
7,6	15,574	14,970	3,879	15,444	0,835
8,2	15,712	14,875	5,326	15,337	2,387
8,3	15,388	14,860	3,432	15,319	0,447
8,7	15,006	14,797	1,388	15,255	1,636
9,5	15,433	14,674	4,917	15,120	2,029
10,5	14,942	14,522	2,815	14,969	0,179

Ao observar a Tabela 6.29 verifica-se que, para o caso do lenho inicial, o modelo que melhor descreve a variação do PCI é modelo obtido por regressão linear, tendo um erro médio de 1,017%, seguindo-se o modelo de Gomes *et al.* (2006), com um erro médio de 2,932%. Ambos os erros são praticamente desprezáveis. No entanto, o modelo obtido por regressão linear descreve melhor a variação do PCI em função do teor de humidade para o lenho inicial.

Seguidamente, através da Tabela 6.30, será realizada a comparação entre os mesmos modelos, para o caso do lenho final.

Tabela 6.30: Comparação dos erros apresentados pelos modelos para o lenho final (%).

M_e (%)	Experimental	Gomes <i>et al.</i> (2006)	Erro	Regressão linear	Erro
0,3	17,092	16,574	3,032	17,009	0,484
0,4	17,186	16,555	3,670	16,992	1,131
1,2	16,875	16,410	2,753	16,838	0,218
1,2	17,073	16,410	3,884	16,823	1,468
3,0	16,208	16,091	0,727	16,491	1,716
3,2	16,239	16,056	1,129	16,453	1,302
3,6	16,220	15,986	1,441	16,382	0,991
3,9	16,086	15,934	0,941	16,328	1,484
4,5	16,413	15,831	3,543	16,214	1,212
5,3	16,148	15,696	2,799	16,047	0,624
5,7	16,112	15,629	2,999	15,972	0,867
6,2	15,751	15,546	1,302	15,877	0,794
6,3	15,578	15,529	0,316	15,871	1,844
6,4	15,700	15,512	1,197	15,854	0,969
6,5	16,120	15,496	3,870	15,835	1,767
7,2	15,765	15,381	2,435	15,700	0,414
7,2	15,491	15,381	0,710	15,697	1,314
7,2	15,358	15,381	0,152	15,694	2,142
7,6	15,898	15,316	3,662	15,627	1,709
8,2	15,843	15,219	3,938	15,503	2,146
8,3	15,502	15,203	1,924	15,483	0,123
8,7	15,113	15,139	0,178	15,409	1,922
9,5	15,508	15,013	3,192	15,252	1,651
10,5	15,139	14,857	1,862	15,078	0,403

No caso do lenho final, constata-se novamente que, o modelo que melhor descreve a variação do PCI, é o modelo da regressão linear com um erro médio de 1,196%, seguindo-se o modelo de Gomes *et al.* (2006), com um erro médio de 2,152%. Os dois modelos apresentam uma diferença de aproximadamente 1%. Contudo, com a utilização do modelo da regressão linear prevê-se com mais rigor a variação do PCI em função do teor de água na amostra. Estes erros são pouco significativos e indicam que ambos descrevem satisfatoriamente a variação do PCI em função do teor de humidade.

Para concluir, é apresentada a comparação entre os modelos que não distinguem os lenhos. Essa confrontação encontra-se explícita na Tabela 6.31.

Tabela 6.31: Comparação dos erros apresentados pelos modelos sem distinção de lenho (%).

M_c (%)	Experimental	Associação Engenheiro Alemães	Erro	Regressão linear	Erro
0,3	16,871	16,776	0,564	16,825	0,272
0,4	16,921	16,774	0,872	16,809	0,661
1,2	16,782	16,753	0,172	16,666	0,695
1,2	16,848	16,753	0,562	16,651	1,169
3,0	16,061	16,708	3,874	16,342	1,721
3,2	16,080	16,703	3,730	16,307	1,388
3,6	16,178	16,693	3,089	16,240	0,386
3,9	15,983	16,686	4,208	16,190	1,273
4,5	16,351	16,671	1,917	16,083	1,637
5,3	16,026	16,650	3,751	15,928	0,614
5,7	15,992	16,640	3,894	15,858	0,842
6,2	15,700	16,628	5,578	15,768	0,431
6,3	15,532	16,625	6,575	15,763	1,464
6,4	15,600	16,623	6,151	15,747	0,934
6,5	15,908	16,620	4,288	15,729	1,120
7,2	15,571	16,603	6,215	15,603	0,207
7,2	15,394	16,603	7,278	15,601	1,325
7,2	15,278	16,603	7,982	15,598	2,052
7,6	15,736	16,593	5,162	15,535	1,279
8,2	15,778	16,578	4,824	15,420	2,269
8,3	15,445	16,575	6,820	15,400	0,287
8,7	15,059	16,565	9,091	15,332	1,777
9,5	15,470	16,545	6,495	15,185	1,842
10,5	15,041	16,520	8,953	15,023	0,117

Através da Tabela 6.31 verifica-se que, a expressão criada através da regressão linear apresenta um erro muito baixo, quando realizada a média dos valores do PCI entre os lenhos. O erro médio cometido pela equação da regressão linear é muito inferior ao erro médio cometido pela equação da Associação dos Engenheiros Alemães. Deste modo, pode concluir-se que não existe necessidade de realizar distinção entre os lenhos, podendo assim, empregar-se a expressão do modelo da regressão linear para calcular o valor de PCI em função do teor de água no interior da madeira de *Pinus pinaster*.

Capítulo 7

Conclusões

7.1. Resultados experimentais

Reunimos aqui as principais conclusões retiradas do trabalho experimental que foi efectuado, relativamente ao poder calorífico superior (PCS) do lenho inicial e do lenho final da madeira da espécie *Pinus pinaster*.

Através dos resultados obtidos experimentalmente pode concluir-se, que de um modo geral, o aumento do teor de água traduz-se na diminuição do PCS do lenho inicial e do lenho final.

Outra conclusão importante prende-se com o facto da temperatura de acondicionamento das amostras, durante o processo de saturação de água, não influenciar o valor final do PCI. Esta conclusão é visível nos resultados experimentais expressos no Capítulo 4, mais concretamente na Tabela 4.1, na qual os coeficientes de variação são muito baixos

7.2. Modelos analíticos

Ao longo do Capítulo 5, foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca de modelos de previsão do poder calorífico, sendo de seguida utilizados em função das características da madeira de *Pinus pinaster*, e, por fim, comparados com o intuito de encontrar o modelo que melhor descreve a variação do PCI em função do teor de humidade.

No decorrer do capítulo dos modelos de previsão do poder calorífico foram utilizadas duas formas distintas de conversão do poder calorífico superior (PCS) em poder calorífico inferior (PCI). Os métodos utilizados foram a expressão utilizada por Almeida (2004) e o método clássico da termodinâmica. Ambos os métodos apresentavam uma diferença de aproximadamente 1 MJ/kg, isto é, de 6%. No entanto, o método escolhido para realizar a conversão foi o método da termodinâmica clássica, com a aplicação das leis termodinâmicas ao caso concreto.

Os modelos em função da composição química não distinguem o lenho inicial do lenho final. Todavia, foram comparados com a média dos valores experimentais entre ambos os lenhos. O modelo que melhor descreve o fenómeno do PCI é o modelo de Dulong, com um erro de aproximadamente 5,9%, enquanto o modelo de Erol V é o modelo que pior descreve o PCI, com um erro de 26,2%. Quando comparados os modelos em função da composição química com a média obtida experimentalmente para cada lenho, verificou-se novamente que o modelo Dulong, descrevia com alguma confiança o poder calorífico inferior, apresentando um erro de 5,2%. O modelo de Erol V manteve-se como sendo o modelo com maior dificuldade em descrever o PCI, com um erro de 25,7%.

No que diz respeito aos modelos que descrevem o PCS em função da composição química, constatou-se que o modelo de Parikh descreve a variação do PCS em função da composição química com bastante confiança, apresentando um erro de 0,6%. O modelo com pior rigor, foi o modelo de Jimenez e Gonzalez, com um erro de 17,5%. Ao comparar estes modelos com a média de cada lenho verificou-se que, tanto para o lenho inicial como final, o modelo de Parikh manteve-se como sendo o modelo

com maior cuidado em descrever a variação do PCS em função da composição química, enquanto o modelo de Jimenez e Gonzalez continuou a sentir dificuldades para descrever este fenómeno.

Nos modelos de descrição do PCI em função do teor de humidade e composição química, apresentaram-se modelos nos quais foi possível distinguir o lenho inicial do lenho final, e modelos no qual não se pode realizar essa distinção. Deste modo, o modelo que melhor descreveu a variação do PCI, sem distinção do lenho, foi o modelo desenvolvido pela Associação dos Engenheiros Alemães com um erro médio de 4,7%, seguido do modelo de Hutte com 4,8%, e, por último, o modelo de Dulong com um erro médio de 5,2%. Nos modelos em que foi possível efectuar uma distinção do lenho, o modelo que melhor descreveu a variação do PCI, tanto para o lenho inicial como para o lenho final, foi o modelo de Schurhaus com um erro de 10,6% para o lenho inicial, e 8,9% para o lenho final.

Para o caso dos modelos matemáticos de determinação do PCI em função do teor de humidade, verificou-se que o modelo de Gomes *et al.* (2006) representa a variação do PCI com o teor de água na amostra com muito rigor. Este modelo apresenta um erro médio de 2,9%, para o lenho inicial, e 2,2% para o lenho final. O modelo de Gomes *et al.* (2006) pode ser usado para prever o fenómeno de variação do PCI em função do teor de humidade na madeira de *Pinus pinaster*.

7.3. Modelação matemática dos resultados experimentais

Ao longo do capítulo da determinação da expressão para o PCI, foram aplicados dois métodos distintos para modelar a variação do PCI em função do teor de humidade, a partir dos resultados experimentais. Por último, foi efectuada uma comparação final entre os modelos publicados e os modelos aqui desenvolvidos.

A interpolação polinomial e a regressão linear foram os métodos escolhidos para determinar a equação de PCI em função do teor de humidade. A regressão linear apresentou um erro médio de 1,0% para o caso do lenho inicial, e 1,2% para o lenho final. Com este método, usando interpolação das diferenças divididas de Newton, foram obtidas equações de grau 5 e grau 3, com o intuito de perceber qual a melhor equação para descrever a variação do PCI. Estas equações foram aplicadas ao lenho inicial e ao

lenho final. Para ambos os lenhos, a equação de 5º grau descreve com mais rigor a variação do PCI em função do teor de água.

Seguidamente efectuou-se uma comparação do modelo de regressão linear com o modelo analítico de Gomes *et al.* (2006). Nesta confrontação, verificou-se que o modelo de regressão linear apresenta melhores resultados, para ambos os lenhos.

Posteriormente, aplicou-se o modelo interpolador à média dos lenhos, com o intuito de encontrar uma equação genérica para o cálculo do PCI. Assim, verificou-se que a equação de 3º grau, apresentou melhores correlações com os valores experimentais, com um erro médio de 1,3%. A equação de 5º grau apresentou um erro médio de 1,6%. Desta forma, conclui-se que, a equação de 3º grau, retirada do método interpolador, é adequada para descrever a variação do PCI em função do teor de água, sem distinção do lenho e temperatura. Posteriormente, comparou-se esta equação com o método de regressão linear, concluindo-se que, a expressão obtida pela regressão linear, apresenta melhor correlação com os valores experimentais.

7.4. Trabalho futuro

No que se refere ao trabalho futuro, do tema apresentado, pretende-se determinar as curvas de TGA, com o intuito de estudar os fenómenos durante o processo de combustão da madeira de *Pinus pinaster*. Posteriormente, pretende-se analisar modelos matemáticos que descrevam uma análise termogravimétrica, e ajustá-los ao caso da madeira de *Pinus pinaster*.

Bibliografia

- Alexandre, P. (2009). *Calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro bravo (pinus pinaster) em Portugal*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.
- Almeida, D. (2004). *Psicometria*. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- ASTM E104-02, A. (2002). *Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions*. ASTM Philadelphia: American Society for Testing and Materials, Book of ASTM Standards.
- Araújo, D. (2008). *Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia .
- Branco, M., Nunes, L., & Pereira, H. (2005). *Importância dos fungos Cromogéneos na Fileira Florestal. Avaliação preliminar da sua distribuição em Portugal*.
- Carvalho, A. P. (2009). *Isotérmica de Sorção da Madeira de Pinho Marítimo (Pinus Pinaster)*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Ciganas, N., & Raila, A. (2010). *Analysis of Heating Value Variations In Stored Wood*. Lituânia: Lithuanian University of Agriculture.
- Christian Staiss e Helena Pereira (2001), “*Energia Renovável na Agricultura e no Sector Florestal*”, Centro de Estudos Florestais 2001.
- CISEPI: *Caracterização de Soluções de Integração Sustentável de Elevados Níveis de Produção Intermitente*, 2001.
- Conte, S., & Boor, C. (s.d.). *Elementary Numerical Analysis - An Algorithmic Approach*. McGraw-Hill.
- Esteves, C. M. (2009). *Identificação das Propriedades de Difusão na Madeira Pinus PinasterAiton*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

- Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Kuçukbayrak, S. (2009). *Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data*. Turquia: Renewable Energy.
- Figuerola, M., & Moraes, P. (2009). *Comportamento da madeira a temperaturas elevadas*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Gatto, D., Santini, E., Haselein, C., & Durlo, M. (2003). *Características da Lenha Produzida na Região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul*. Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.
- Gomes, S., Paraíso, P., & Andrade, C. (2006). *Análise Preliminar da Viabilidade de Cultivos Florestais para Produção de Energia Eléctrica*. Espaço Energia.
- International Energy Agency (IEA), 2007a, *Key world energy statistics 2007*, 82 pp, <http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf>
- Junior, J. A. (2006). *Avaliação Não Destrutiva da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira de Edifícios Antigos*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Louzada, L., Fonseca, F., & Silva, M. (1994). *Relação entre componentes da densidade da madeira no lenho juvenil e no lenho adulto em Pinus pinaster Ait*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Lousada, J., Noronha, M., Lopes, D., & Silva, M. (2008). *Relações entre Peso, Volume e Densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (Pinus pinaster Ait.) Cultivado em Portugal*. Vila Real: CITAB/Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Lima, E., Abdala, E., & Wenzel, A. (2008). *Influência da humidade no poder calorífico superior da madeira*. Comunicado técnico.
- Majumder, A., Jain, R., Banergee, P., & Barnwal, J. (2008). *Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal*. Fuel.
- Martins, S. F. (2009). *Estruturas de Madeira-Inspecção e diagnóstico. Aplicação em casos de estudo*. Universidade do Minho.

- Netto, C. (2008). *Potencial de biomassa florestal residual para fins energéticos de três conselhos do distrito de Santarém*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Quirino, W., Vale, A., Andrade, A., Abreu, V., & Azevedo, A. (2005). *PODER CALORÍFICO DA MADEIRA E DE MATERIAIS LIGNO-CELULÓSICOS*. Brasil: Revista da Madeira.
- Santos, J. A. (2007). *Estudo de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira - Tese de Doutoramento*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Schurhaus, P. (2007). *Produtos e Propriedades Energéticas da Madeira*. Brasil: Centro Universitário de União da Vitória.
- Sonntag, R., Borgnakke, C., & Wylen, G. (2002). *Fundamentals of Thermodynamics, Fifth Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Telmo, C., Lousada, J., & Moreira, N. (2010). *Proximate Analysis, Backwards Stepwise Regression Between Gross Calorific Value, Ultimate and Chemical Analysis of Wood*. Vila Real : Bioresource Technology.
- Telmo, C., Lousada, J., & Moreira , N. (2010). *Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific*. ELSEVIER.
- Vale, A., Brasil, M., Carvalho , C., & Veiga, R. (2000). *PRODUÇÃO DE ENERGIA DO FUSTE DE Eucalyptus grandis HILL EX-MAIDEN e Acacia mangium WILLD EM DIFERENTES NÍVEIS DE ADUBAÇÃO*. Brasília: Departamento de Engenharia Florestal.
- Xavier, J. (2003). *Caracterização do Comportamento ao Corte da Madeira Usando o Ensaio de Losipescu*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Anexo 1

Tabela A.1: Poder calorífico de lenhos de estilha totalmente seca

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	LIS01	1	0,578	29,7738	30,0105	800	3,3202	18,805
	LIS02	1	0,596	29,9696	29,9951	800	3,4025	18,700
	LIS03	1	0,582	30,0351	30,0008	800	3,3553	18,878
	LIS04	1	0,594	30,038	30	800	3,4296	18,916
	LIS05	1	0,587	30,1022	29,9945	800	3,3867	18,897
	LIS06	1	0,599	30,4302	30,1077	800	3,4502	18,873
Lenho Final	LFS01	1	0,581	30,0771	30,0076	800	3,4016	19,178
	LFS02	1	0,598	30,0805	30,0017	800	3,5185	19,287
	LFS03	1	0,596	30,1930	30,0043	800	3,5107	19,308
	LFS04	1	0,594	30,4307	30,1131	800	3,4733	19,163
	LFS05	1	0,591	30,3981	30,1136	800	3,4536	19,148
	LFS06	1	0,573	30,2671	30,1139	800	3,3664	19,240

Tabela A.2: Poder calorífico dos lenhos para 11% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H1T1I01	1	0,5757	29,9011	30,0247	800	3,4197	19,4594
	H1T1I02	3	0,5860	29,7519	29,998	800	3,4182	19,1087
	H1T1I03	3	0,5900	30,0624	30,0168	800	3,3952	18,8489
	H1T1I04	1	0,5600	30,1166	30,0083	800	3,2836	19,1911
	H1T1I05	1	0,5720	30,1259	29,9958	800	3,3086	18,935
Lenho Final	H1T1F01	1	0,575	30,1278	29,9984	800	3,3817	19,262
	H1T1F02	1	0,574	30,1424	30,0042	800	3,3649	19,197
	H1T1F03	1	0,584	30,1307	29,9982	800	3,4467	19,338
	H1T1F04	1	0,568	30,13	30,0067	800	3,348	19,305
	H1T1F05	1	0,582	30,1408	30,0037	800	3,4397	19,364

Tabela A.3: Poder calorífico dos lenhos para 11% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H1T2I01	1	0,596	30,0395	29,9904	800	3,4831	19,153
	H1T2I02	1	0,573	30,0817	29,9961	800	3,336	19,062
	H1T2I03	1	0,578	30,1001	30,0046	800	3,3492	18,974
	H1T2I04	1	0,596	30,0772	30,0002	800	3,4763	19,115
	H1T2I05	1	0,589	30,0755	29,9885	800	3,4014	18,916
	H1T2I06	1	0,588	30,105	29,9988	800	3,2643	18,168
Lenho Final	H1T2F01	1	0,583	30,0609	30,0021	800	3,479	19,557
	H1T2F02	1	0,595	30,0703	30,0201	800	3,5316	19,458
	H1T2F03	1	0,578	30,0292	30,0032	800	3,4429	19,517
	H1T2F04	1	0,585	30,073	30,0041	800	3,4482	19,314
	H1T2F05	1	0,591	30,0237	30,0011	800	3,5101	19,468

(*)

Tabela A.4: Poder calorífico dos lenhos para 11% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H1T3I01	1	0,594	29,9683	29,9978	800	3,4309	18,923
	H1T3I02	1	0,593	30,2237	29,9903	800	3,4564	19,099
	H1T3I03	1	0,599	30,3283	30,0471	800	3,4736	19,004
	H1T3I04	1	0,584	30,4169	30,1032	800	3,3603	18,844
	H1T3I05	1	0,587	30,4749	30,1118	800	3,4464	19,237
Lenho Final	H1T3F01	1	0,597	30,1251	30,5425	800	3,5425	19,454
	H1T3F02	1	0,597	30,5494	30,1532	800	3,5384	19,431
	H1T3F03	1	0,600	30,5598	30,1781	800	3,5538	19,420
	H1T3F04	1	0,596	30,5662	30,1939	800	3,5527	19,544

Tabela A.5: Poder calorífico dos lenhos para 11% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H1T4I01	1	0,588	30,0371	30,0034	800	3,4425	19,183
	H1T4I02	1	0,588	30,2492	30,0092	800	3,3693	18,766
	H1T4I03	1	0,598	30,2915	30,036	800	3,4617	18,969
	H1T4I04	1	0,593	30,3322	30,0619	800	3,401	18,786
	H1T4I05	1	0,6	30,3352	30,0677	800	3,4996	19,118
	H1T4I06	1	0,579	30,3996	30,1069	800	3,3928	19,193
Lenho Final	H1T4F01	1	0,582	30,3733	30,0827	800	3,4782	19,586
	H1T4F02	1	0,593	30,4152	30,0963	800	3,5222	19,471
	H1T4F03	1	0,592	30,402	30,1151	800	3,5408	19,609
	H1T4F04	1	0,586	30,4716	30,1441	800	3,4914	19,527
	H1T4F05	1	0,596	30,4418	30,0987	800	3,5392	19,469

Tabela A.6: Poder calorífico dos lenhos para 30% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H2T1I01	3	0,5780	30,0659	30,0044	800	3,2417	18,3505
	H2T1I02	3	0,5930	30,1499	30,0101	800	3,3171	18,3124
	H2T1I03	3	0,5950	30,1096	29,9968	800	3,3348	18,3507
	H2T1I04	3	0,5970	30,1075	29,9925	800	3,3588	18,4236
	H2T1I05	3	0,5840	30,1372	30,0015	800	3,2743	18,3489
	H2T1I06	3	0,5920	30,1536	30,0048	800	3,3012	18,2534
Lenho Final	H2T1F01	3	0,5780	30,1364	29,9991	800	3,2930	18,6481
	H2T1F02	3	0,5770	30,1476	29,9932	800	3,2954	18,6943
	H2T1F03	3	0,5910	30,1457	29,9853	800	3,3431	18,5215
	H2T1F04	3	0,5940	30,1299	30,0023	800	3,3760	18,6135
	H2T1F05	3	0,5810	30,0865	30,0019	800	3,3344	18,7903
	H2T1F06	3	0,5970	30,1848	30,0065	800	3,4042	18,6784

Tabela A.7: Poder calorífico dos lenhos para 30% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H2T2I01	3	0,598	30,0966	30,0183	800	3,3833	18,5300
	H2T2I02	1	0,591	30,5933	29,9654	800	3,3419	18,5149
	H2T2I03	1	0,594	30,0778	30,0117	800	3,348	18,4555
	H2T2I04	1	0,593	30,1035	29,9985	800	3,3635	18,5745
	H2T2I05	1	0,591	30,0950	30,0183	800	3,3589	18,6114
Lenho Final	H2T2F01	1	0,589	30,1418	30,0048	800	3,3493	18,6199
	H2T2F02	1	0,585	30,6112	29,9226	800	3,3497	18,7495
	H2T2F03	1	0,579	29,9969	30,0108	800	3,2928	18,6146
	H2T2F04	1	0,591	30,0032	29,9994	800	3,3529	18,5772
	H2T2F05	1	0,583	29,9776	30,0023	800	3,2492	18,2366

Tabela A.8: Poder calorífico dos lenhos para 30% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H2T3I01	1	0,593	30,6385	30,2216	800	3,2776	18,090
	H2T3I02	1	0,586	30,6746	30,2316	800	3,2367	18,072
	H2T3I03	1	0,581	30,6233	30,2521	800	3,2155	18,105
	H2T3I04	1	0,584	30,6624	30,2573	800	3,2335	18,115
	H2T3I05	1	0,597	30,8802	30,3077	800	3,2893	18,034
Lenho Final	H2T3F01	1	0,596	30,8108	30,2937	800	3,337	18,332
	H2T3F02	1	0,591	30,9548	30,337	800	3,2989	18,271
	H2T3F03	1	0,581	30,9765	30,3757	800	3,1805	17,903
	H2T3F04	1	0,570	30,6574	30,3176	800	3,1891	18,299
	H2T3F05	1	0,582	30,8910	30,2991	800	3,2486	18,264

Tabela A.9: Poder calorífico dos lenhos para 30% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H2T4I01	1	0,595	30,228	30,1248	800	3,244	17,839
	H2T4I02	1	0,6	30,5039	30,15	800	3,2747	17,862
	H2T4I03	1	0,593	30,5438	30,1559	800	3,2487	17,926
	H2T4I04	1	0,593	30,5829	30,1813	800	3,2542	17,957
	H2T4I05	1	0,598	30,5935	30,2106	800	3,2918	18,017
Lenho Final	H2T4F01	1	0,594	30,6265	30,2305	800	3,284	18,095
	H2T4F02	1	0,589	30,6704	30,241	800	3,3075	18,382
	H2T4F03	1	0,587	30,6264	30,253	800	3,2864	18,324
	H2T4F04	1	0,589	30,5793	30,2495	800	3,285	18,254
	H2T4F05	1	0,595	30,6594	30,25	800	3,3022	18,167

Tabela A.10: Poder calorífico dos lenhos para 50% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H3T1I01	3	0,5860	30,0839	29,9978	800	3,2754	18,2930
	H3T1I02	3	0,5900	30,0831	30,0015	800	3,2822	18,2075
	H3T1I03	3	0,5920	30,1068	30,0055	800	3,3089	18,2970
	H3T1I04	3	0,5900	30,1943	30,0010	800	3,3114	18,3732
	H3T1I05	3	0,5940	30,0373	29,9997	800	3,3338	18,3758
	H3T1I06	3	0,5910	30,1816	30,0054	800	3,2957	18,2530
Lenho Final	H1T1F01	3	0,5950	30,1534	30,0100	800	3,3661	18,5261
	H1T1F02	3	0,5930	30,1954	30,0074	800	3,3409	18,4466
	H1T1F03	3	0,5820	30,1291	30,0016	800	3,2834	18,4645
	H1T1F04	3	0,5870	30,2077	29,9941	800	3,3329	18,5896
	H1T1F05	3	0,5930	30,1977	29,9860	800	3,3494	18,4947

Tabela A.11: Poder calorífico dos lenhos para 50% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H3T2I01	1	0,593	29,6103	29,9706	800	3,3087	18,265
	H3T2I02	1	0,592	29,925	29,9907	800	3,343	18,490
	H3T2I03	1	0,596	30,0229	29,9804	800	3,3814	18,581
	H3T2I04	1	0,583	30,044	29,9941	800	3,2364	18,163
	H3T2I05	1	0,600	30,0448	30,002	800	3,3546	18,308
Lenho Final	H3T2F01	1	0,595	30,0431	30,0137	800	3,3753	18,579
	H3T2F02	1	0,596	30,0641	29,0016	800	3,3535	18,425
	H3T2F03	1	0,599	30,0854	30,0004	800	3,4356	18,792
	H3T2F04	1	0,599	30,1139	29,9944	800	3,4019	18,603
	H3T2F05	1	0,597	30,122	30,0137	800	3,3967	18,636

Tabela A.12: Poder calorífico dos lenhos para 50% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H3T3I01	1	0,587	29,9712	30,0118	800	3,2585	18,165
	H3T3I02	1	0,591	30,1828	30,0082	800	3,3059	18,311
	H3T3I03	1	0,586	30,1739	29,994	800	3,2883	18,366
	H3T3I04	1	0,594	30,2282	29,5513	800	3,2962	18,164
	H3T3I05	1	0,590	30,2164	29,9595	800	3,3101	18,366
Lenho Final	H3T3F01	1	0,593	30,2643	29,9826	800	3,3384	18,433
	H3T3F02	1	0,593	30,2399	29,9839	800	3,3361	18,420
	H3T3F03	1	0,586	30,2839	29,9897	800	3,3278	18,592
	H3T3F04	1	0,573	30,2661	29,9994	800	3,2561	18,595
	H3T3F05	1	0,590	30,2658	30,0014	800	3,3432	18,554

Tabela A.13: Poder calorífico dos lenhos para 50% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H3T4I01	1	0,596	30,5905	30,2143	800	3,4307	18,859
	H3T4I02	1	0,584	30,6207	30,2242	800	3,299	18,491
	H3T4I03	1	0,597	30,6362	30,213	800	3,3618	18,440
	H3T4I04	1	0,588	30,606	30,2074	800	3,3667	18,751
Sem estilha devido a problemas no calorimetro								
Lenho Final	H3T4F01	1	0,600	30,4951	30,205	800	3,4129	18,634
	H3T4F02	1	0,583	30,6144	30,2017	800	3,3766	18,968
	H3T4F03	1	0,586	30,5812	30,2198	800	3,3432	18,680
	H3T4F04	1	0,595	30,5443	30,2091	800	3,4263	18,866
	H3T4F05	1	0,593	30,3863	30,1853	800	3,3765	18,648

Tabela A.14: Poder calorífico dos lenhos para 60% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H4T1I01	3	0,5960	30,1537	29,9984	800	3,2695	17,9526
	H4T1I02	3	0,5900	30,1134	29,9993	800	3,2228	17,8703
	H4T1I03	3	0,5850	30,1191	29,9951	800	3,2033	17,9112
	H4T1I04	3	0,5980	30,1344	30,016	800	3,2637	17,8600
	H4T1I05	3	0,5890	30,1452	29,9968	800	3,228	17,9300
Lenho Final	H4T1F01	3	0,583	30,1572	30,0055	800	3,1959	17,9303
	H4T1F02	3	0,591	30,1328	29,9992	800	3,2398	17,9362
	H4T1F03	3	0,590	30,1383	29,9948	800	3,2324	17,9247
	H4T1F04	3	0,595	30,1367	30,0025	800	3,2968	18,137
	H4T1F05	3	0,593	30,1459	29,9913	800	3,2718	18,056

Tabela A.15: Poder calorífico dos lenhos para 60% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H4T2I01	1	0,59	30,09	30,0125	800	3,2499	18,024
	H4T2I02	1	0,591	30,1369	29,9916	800	3,2728	18,123
	H4T2I03	1	0,581	30,127	29,9953	800	3,1834	17,920
	H4T2I04	1	0,595	30,106	30,0175	800	3,2805	18,045
	H4T2I05	1	0,580	30,1414	30,0034	800	3,2039	18,069
Lenho Final	H4T2F01	1	0,592	30,1437	30,0099	800	3,2781	18,123
	H4T2F02	1	0,59	30,1382	30,0037	800	3,2819	18,206
	H4T2F03	1	0,588	30,1236	30,0013	800	3,2538	18,107
	H4T2F04	1	0,599	30,1444	30,0084	800	3,3201	18,145
	H4T2F05	1	0,595	30,1545	30,0039	800	3,3201	18,268

Tabela A.16: Poder calorífico dos lenhos para 60% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H4T3I01	1	0,599	30,0031	3,2367	800	3,2367	17,679
	H4T3I02	1	0,58	30,2511	30,0033	800	3,1619	17,827
	H4T3I03	1	0,57	30,2646	30,0017	800	3,1143	17,860
	H4T3I04	1	0,589	30,2649	30,0036	800	3,1941	17,737
	H4T3I05	1	0,58	30,2088	30,0083	800	3,177	17,914
Lenho Final	H4T3F01	1	0,596	30,244	30,0216	800	3,2457	17,819
	H4T3F02	1	0,585	30,213	30,0246	800	3,189	17,830
	H4T3F03	1	0,579	30,193	30,0278	800	3,1795	17,959
	H4T3F04	1	0,586	30,2283	30,0284	800	3,1997	17,860
	H4T3F05	1	0,594	30,2437	30,0316	800	3,2541	17,926

Tabela A.17: Poder calorífico dos lenhos para 60% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H4T4I01	1	0,592	29,9615	29,9955	800	3,2912	18,197
	H4T4I02	1	0,583	30,1861	29,9915	800	3,2333	18,145
	H4T4I03	1	0,596	30,2839	30,0021	800	3,3018	18,134
	H4T4I04	1	0,595	30,3168	30,0322	800	3,3079	18,199
	H4T4I05	1	0,591	30,3599	30,0542	800	3,325	18,419
Lenho Final	H4T4F01	1	0,588	30,3937	30,0656	800	3,3135	18,448
	H4T4F02	1	0,596	30,4199	30,0796	800	3,3612	18,468
	H4T4F03	1	0,597	30,4503	30,0903	800	3,3581	18,420
	H4T4F04	1	0,598	30,4627	30,0939	800	3,3628	18,415
	H4T4F05	1	0,597	30,4714	30,0995	800	3,3797	18,541

Tabela A.18: Poder calorífico dos lenhos para 75% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H5T1I01	3	0,5890	29,627	29,9492	800	3,1638	17,5648
	H5T1I02	3	0,5892	29,9156	30,0139	800	3,1895	17,7112
	H5T1I03	3	0,5880	29,954	29,9993	800	3,1928	17,7602
	H5T1I04	3	0,5890	29,9454	29,9567	800	3,1967	17,7522
	H5T1I05	3	0,5960	30,0089	29,9953	800	3,2147	17,6445
	H5T1I06	3	0,5980	29,9909	30,003	800	3,2645	17,8648
Lenho Final	H5T1F01	3	0,591	30,0116	30,0159	800	3,2223	17,8369
	H5T1F02	3	0,587	30,0302	29,9906	800	3,2242	17,9696
	H5T1F03	3	0,589	30,0581	30,0067	800	3,2196	17,8825
	H5T1F04	3	0,588	30,0551	30,0040	800	3,2241	17,9386
	H5T1F05	3	0,584	30,0464	30,0195	800	3,1996	17,9208

Tabela A.19: Poder calorífico dos lenhos para 75% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H5T2I01	1	0,596	30,0609	30,0021	800	3,2602	17,900
	H5T2I02	1	0,587	30,1471	30,0041	800	3,1955	17,805
	H5T2I03	1	0,58	30,147	30,0122	800	3,176	17,908
	H5T2I04	1	0,592	30,110	30,004	800	3,2378	17,895
	H5T2I05	1	0,586	30,1436	29,9996	800	3,2036	17,883
Lenho Final	H5T2F01	1	0,597	30,1604	29,9973	800	3,3003	18,095
	H5T2F02	1	0,597	30,1368	29,9905	800	3,3114	18,158
	H5T2F03	1	0,594	30,1278	30,003	800	3,2825	18,087
	H5T2F04	1	0,59	30,1443	29,9916	800	3,253	18,042
	H5T2F05	1	0,591	30,0922	30,004	800	3,2925	18,235

Tabela A.20: Poder calorífico dos lenhos para 75% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H5T3I01	1	0,59	30,2211	30,0312	800	3,2176	17,841
	H5T3I02	1	0,577	30,2641	30,124	800	3,1342	17,759
	H5T3I03	1	0,593	30,2646	30,0238	800	3,2195	17,761
	H5T3I04	1	0,591	30,2549	30,0258	800	3,171	17,546
	H5T3I05	1	0,58	30,2705	30,0241	800	3,1467	17,739
Lenho Final	H5T3F01	1	0,593	30,0269	30,0269	800	3,2348	17,848
	H5T3F02	1	0,588	30,0256	30,0256	800	3,211	17,864
	H5T3F03	1	0,589	30,2577	30,0246	800	3,2345	17,967
	H5T3F04	1	0,584	30,2358	30,0201	800	3,199	17,918
	H5T3F05	1	0,589	30,2151	30,0199	800	3,2178	17,872

Tabela A.21: Poder calorífico dos lenhos para 75% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H5T4I01	1	0,595	30,4774	30,1052	800	3,2798	18,041
	H5T4I02	1	0,594	30,4963	30,1237	800	3,256	17,937
	H5T4I03	1	0,584	30,4771	30,1363	800	3,227	18,078
	H5T4I04	1	0,579	30,4938	30,1486	800	3,2007	18,082
	H5T4I05	1	0,596	30,4718	30,1542	800	3,2904	18,070
Lenho Final	H5T4F01	1	0,592	30,5447	30,1564	800	3,2878	18,178
	H5T4F02	1	0,597	30,6015	30,2233	800	3,454	18,958
	H5T4F03	1	0,586	30,6646	30,1908	800	3,2785	18,311
	H5T4F04	1	0,596	30,5295	30,1217	800	3,3684	18,508
	H5T4F05	1	0,590	30,5617	30,1307	800	3,3119	18,376

Tabela A.22: Poder calorífico dos lenhos para 80% de humidade e 35°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H6T1I01	1	0,5850	30,1007	29,9924	800	3,1164	17,4137
	H6T1I02	1	0,5910	30,0853	30,0093	800	3,1469	17,4100
	H6T1I03	1	0,5990	30,0945	30,0159	800	3,1843	17,3865
	H6T1I04	1	0,5980	30,0559	29,9887	800	3,1966	17,4841
	H6T1I05	1	0,5930	30,0854	30,0051	800	3,1603	17,4269
Lenho Final	H6T1F01	1	0,595	30,0903	30,0003	800	3,1917	17,5449
	H6T1F02	1	0,586	30,0527	30,017	800	3,1396	17,5165
	H6T1F03	1	0,598	30,1090	29,9966	800	3,1911	17,4537
	H6T1F04	1	0,596	30,0945	29,9980	800	3,2084	17,6094
	H6T1F05	1	0,594	30,1032	29,9882	800	3,1841	17,5313

Tabela A.23: Poder calorífico dos lenhos para 80% de humidade e 45°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H6T2I01	1	0,594	30,1182	30,0001	800	3,1808	17,5132
	H6T2I02	1	0,584	30,0819	30,0018	800	3,1522	17,6490
	H6T2I03	1	0,590	30,0745	30,0086	800	3,2048	17,768
	H6T2I04	1	0,59	30,0883	29,9862	800	3,1846	17,653
	H6T2I05	1	0,587	30,1015	29,9932	800	3,1304	17,434
Lenho Final	H6T2F01	1	0,592	30,0881	29,9977	800	3,1946	17,650
	H6T2F02	1	0,593	30,1045	29,997	800	3,2169	17,747
	H6T2F03	1	0,597	30,1199	29,9892	800	3,2350	17,729
	H6T2F04	1	0,592	30,1394	30,0084	800	3,2218	17,804
	H6T2F05	1	0,585	30,1421	29,9948	800	3,1854	17,809

Tabela A.24: Poder calorífico dos lenhos para 80% de humidade e 55°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H6T3I01	1	0,587	30,2184	30,0191	800	3,1173	17,359
	H6T3I02	1	0,595	30,1951	30,0161	800	3,1345	17,223
	H6T3I03	1	0,6	30,1614	30,0181	800	3,1926	17,404
	H6T3I04	1	0,582	30,2126	30,0216	800	3,0941	17,375
	H6T3I05	1	0,557	30,1371	30,0211	800	2,9359	17,203
Lenho Final	H6T3F01	1	0,593	30,2132	30,0297	800	3,1638	17,446
	H6T3F02	1	0,596	30,1468	30,0232	800	3,1003	17,002
	H6T3F03	1	0,598	30,2595	30,0168	800	3,2461	17,762
	H6T3F04	1	0,578	30,0297	30,0046	800	3,1218	17,656
	H6T3F05	1	0,574	30,2544	30,0167	800	3,1055	17,684

Tabela A.25: Poder calorífico dos lenhos para 80% de humidade e 65°C

Amostra	Referência	Bomba	Peso (g)	Init. Time	Jacket T	EE Value	Temp. Rise	Gross Heat (MJ/kg)
Lenho Inicial	H6T4I01	1	0,581	30,5524	30,1389	800	3,1718	17,853
	H6T4I02	1	0,594	30,581	30,1842	800	3,1144	17,139
	H6T4I03	1	0,584	30,5642	30,1892	800	3,1823	17,821
	H6T4I04	1	0,581	30,5507	30,2013	800	3,1687	17,835
	H6T4I05	1	0,595	30,5627	30,2129	800	3,2668	17,968
Lenho Final	H6T4F01	1	0,592	30,5461	30,2286	800	3,278	18,122
	H6T4F02	1	0,591	30,6594	30,2277	800	3,2464	17,973
	H6T4F03	1	0,598	30,6384	30,2344	800	3,3111	18,126
	H6T4F04	1	0,600	30,6189	30,2355	800	3,3303	18,173
	H6T4F05	1	0,599	30,5874	30,2397	800	3,323	18,162