

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

FELIPE DA SILVEIRA MINUCELI

**Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos:  
o estudo do coco verde**

Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais da  
Escola Politécnica da USP

São Paulo

2018

FELIPE DA SILVEIRA MINUCELI

**Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos:  
o estudo do coco verde**

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Departamento de Engenharia Metalúrgica  
e de Materiais da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda  
Mourão

Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais da  
Escola Politécnica da USP

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

TF-2018  
M668a  
H-2018 U  
2925801

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009347

Minuceli, Felipe

Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos: o estudo do coco verde / F. Minuceli -- São Paulo, 2018.

93 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Carvão vegetal 2.Pirólise lenta 3.Aproveitamento energético 4.Coco verde 5.Carbono fixo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

## DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico esse trabalho a todos familiares que de alguma forma contribuíram para os meus crescimentos pessoal e acadêmico, em especial aos meus pais e avós.

Segundo, dedico a todos os meus professores que fizeram parte da minha trajetória até hoje, sejam por ensinamentos de cunho acadêmico, sejam por ensinamentos que vou levar para a vida toda.

Terceiro, gratidão a todos que, diretamente ou não, contribuíram em algum aspecto para eu me tornar a pessoa que sou.

der meio  
a fonte.

oco

## AGRADECIMENTOS

Depois de um trabalho tão extenso e importante quanto esse fica até difícil saber a qual, ou quais, pessoas agradecer. Fica difícil em lembrar de todas aquelas pessoas que fizeram parte da sua trajetória e que contribuíram com todo o conhecimento traduzido na forma desse trabalho.

Assim, vale a pena começar pelas pessoas mais importantes da minha vida, no caso, meus pais, meus avós e meu irmão. Eles que tanto incentivaram meus estudos, cobraram quando deviam cobrar, comemoraram e também repreenderam, tudo no seu devido momento. Eles que estiveram desde minha primeira formatura no Ensino Fundamental e que, com certeza, estarão no dia em que eu receberei o diploma de uma das melhores faculdades de engenharia da América Latina, a Escola Politécnica da USP. Esse agradecimento vai a vocês.

Escola essa que, além de muito conhecimento, deu-me muitos amigos. Sejam eles amigos de classe ou aqueles que simplesmente fizeram parte em algum trabalho comigo. Mas, sem dúvida nenhuma, um agradecimento especial àqueles quem eu conheci na Associação Atlética Acadêmica Politécnica (AAAP), em especial aos membros e muitíssimo amigos da gestão de 2016 (LX Tons de Azul e Amarelo), mais precisamente aos AAAProdígios. Local que me acolheu desde o primeiro dia de aula e que, desde então, passou a fazer parte da minha vida me proporcionando histórias, risadas, muito trabalho, viagens e amigos para a vida toda.

E, como nem só de festa se fez a faculdade, um agradecimento a todos os professores e funcionários da Escola Politécnica e da Universidade de São Paulo, que de alguma forma contribuíram com o conhecimento que pôde ser transmitido nesse trabalho. Um agradecimento em especial ao Professor Doutor Marcelo Breda Mourão por aceitar ser meu orientador e pela excelente relação construída ao longo desse trabalho de formatura. Um muito obrigado ao doutorando pela Escola Politécnica Cesar Yuji Narita por toda a ajuda e atenção dados com a parte experimental inicial deste trabalho, responsável por, muitas vezes, mostrar-me o caminho menos trabalhoso devido a toda sua experiência com o tema. Mais um muito obrigado ao mestrando pela Escola Politécnica Vitor Hugo Boari pela ajuda e atenção com toda a parte das análises imediatas contidas nesse trabalho. E, por último, um agradecimento ao Professor Doutor Jorge Alberto Soares Tenório por disponibilizar seu laboratório,

situado no Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica, para a realização de importantes análises da parte experimental desse trabalho.

Sem dúvida nenhuma todas as pessoas citadas tiveram alguma contribuição para eu me tornar a pessoa que sou hoje e, para cada uma de vocês, meu muitíssimo obrigado.

*“... Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena.”*

*Fernando Pessoa*

## RESUMO

MINUCELI, F. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos: o estudo do coco verde**. 2018. 97f. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Este trabalho tem o objetivo de estudar a produção de carvão vegetal, pelo método da carbonização, a partir do coco verde da espécie *Cocos nucifera* e sua viabilidade energética. Para isso, utilizou-se das seguintes etapas: lavagem, moagem, carbonização, análise da composição imediata, MEV, EDS, medição do poder calorífico e DRX. Optou-se pela pirólise lenta, pois privilegia a produção de carvão. Assim, avaliou-se a influência da temperatura de carbonização na qualidade do carvão produzido (porosidade, teores de cinzas, umidade e voláteis), assim como esse parâmetro também influencia no teor de carbono fixo e no rendimento energético. Para um dos cálculos mais importantes, do poder calorífico no caso, utilizou-se quatro métodos, mas o mais vantajoso foi o experimental, o qual foi possível obter uma equação empírica. Ao final, definiu-se uma temperatura ótima (máximos do teor de carbono fixo x rendimento energético) para produção desse carvão vegetal que terá o uso comercial como destino devido, principalmente, ao teor de carbono fixo conseguido.

Palavras-chave: Coco verde. Pirólise lenta. Carvão vegetal. Temperatura. Carbono fixo. Poder calorífico.



## ABSTRACT

MINUCELI, F. **Energy use of organic solid wastes: the study of green coconut.** 2018. 97p. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

This work has the objective of studying the production of charcoal by the carbonization method, from *Cocos nucifera* green coconut and its energy viability. For this, the following steps were used: washing, milling, carbonization, immediate composition analysis, SEM, EDS, calorific value and XRD. It was chosen for the slow pyrolysis, because it favors the production of coal. Thus, the influence of the carbonization temperature on the quality of the produced coal (porosity, ash, moisture and volatile contents) was evaluated, as well as this parameter also influences the fixed carbon content and the energy yield. For one of the most important calculations, the heat combustion, four methods were used, but the most advantageous was the experimental one, which was possible to obtain an empirical equation. At the end, an optimum temperature (maximum of the fixed carbon content x energy yield) was defined to produce this charcoal, which will have commercial use as a destination, mainly due to the fixed carbon content achieved.

Keywords: Green coconut. Slow pyrolysis. Charcoal. Temperature. Fixed carbon. Heat combustion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Avanço do cultivo de coqueiros nos estados brasileiros em 1990 e 2014. .	5
Figura 2 - Fontes de biomassa.....	9
Figura 3 - Corte longitudinal do coco, com as suas partes. ....	14
Figura 4 - Principais componentes da biomassa lignocelulósica .....	18
Figura 5 - Esquema de um calorímetro .....	25
Figura 6 - Exemplar de coco para a parte experimental. ....	26
Figura 7 - Estufa de secagem.....	27
Figura 8 - Amostras de coco secas.....	30
Figura 9 - Moinho de facas, tipo Miley, Model 4 .....	30
Figura 10 - Peneira 60 mesh passante. ....	31
Figura 11 - Moinho de bolas.....	31
Figura 12 - Amostra final após moagem.....	32
Figura 13 - Retorta utilizada na carbonização .....	33
Figura 14 - Estufa pré carbonização .....	34
Figura 15 - Central eletrônica de ajuste dos parâmetros da carbonização .....	34
Figura 16 - Forno Lindberg-Blue usado na carbonização .....	35
Figura 17 - Capela acoplada ao forno vertical.....	35
Figura 18 - Amostra de coco carbonizadas nas temperaturas: A) 200°C; B) 300°C; C) 500°C; D) 700°C .....	36
Figura 19 - Balança utilizada na medição do teor de umidade .....	37
Figura 20 - Equipamento IV2000.....	38
Figura 21 - Balança utilizada.....	39
Figura 22 - Cadinho utilizado na análise de voláteis .....	40
Figura 23 - Cadinhos utilizados na análise de cinzas .....	42
Figura 24 - Forno tipo mufla .....	42
Figura 25 - Equipamento utilizado para metalização .....	44
Figura 26 - MEV utilizado .....	45
Figura 27 - Bomba calorimétrica .....	47
Figura 28 - Difratômetro utilizado .....	48
Figura 29 - Visão geral, com aumento de 150x, de cinco amostras de coco verde, sendo: A)Seco; B) Carbonizado 200°C; C) Carbonizado 300°C; D) Carbonizado 500°C; E) Carbonizado 700°C. ....	58
Figura 30 - Avaliação da porosidade nas amostras de coco verde. Sendo, respectivamente, coco verde seco, carbonizados a 200, 300, 500 e 700°C, para diferentes aumentos.....	59
Figura 31 - Área usada para EDS da amostra seca .....	60
Figura 32 - Espectro de EDS ponto 1.....	61
Figura 33 - Espectro de EDS ponto 2.....	61
Figura 34 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 200°C.....	62
Figura 35 - Espectro de EDS ponto 1.....	63
Figura 36 - Espectro de EDS ponto 2.....	63
Figura 37 - Espectro de EDS ponto 3.....	63
Figura 38 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 300°C.....	64
Figura 39 - Espectro de EDS ponto 1.....	65
Figura 40 - Espectro de EDS ponto 2.....	65
Figura 41 - Espectro de EDS ponto 3.....	65

Figura 42 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 500°C.....	66
Figura 43 - Espectro de EDS ponto 1.....	66
Figura 44 - Espectro de EDS ponto 2.....	67
Figura 45 - Espectro de EDS ponto 3.....	67
Figura 46 - Espectro de EDS ponto 4.....	67
Figura 47 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 700°C.....	68
Figura 48 - Espectro de EDS ponto 1.....	68
Figura 49 - Espectro de EDS ponto 2.....	69
Figura 50 - Espectro de EDS ponto 3.....	69
Figura 51 - Difratoograma amostras de coco verde .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção, área colhida e produtividade dos principais países produtores de coco, em 2012. ....	3
Tabela 2 - Produção de coco verde no Brasil em 2010. ....	7
Tabela 3 - Características dos processos para diferentes tipos de pirólises.....	19
Tabela 4 - Relação das quantidades obtidas dos produtos pirolíticos para os diferentes processos .....	19
Tabela 5 - Versões da tecnologia de pirólise.....	21
Tabela 6 - Massa inicial cocos e as respectivas porcentagens. ....	27
Tabela 7 - Pesagem periódica 1.....	28
Tabela 8 - Pesagem periódica 2.....	28
Tabela 9 - Pesagem periódica 3.....	28
Tabela 10 - Pesagem periódica 4.....	28
Tabela 11 - Pesagem periódica 5.....	29
Tabela 12 - Parâmetros definidos para carbonização .....	32
Tabela 13 - Dados análises de umidade .....	38
Tabela 14 - Parâmetros análises de voláteis.....	40
Tabela 15 - Dados análises voláteis.....	41
Tabela 16 - Parâmetro análise de cinzas .....	43
Tabela 17 - Dados análises de cinzas.....	43
Tabela 18 - Dados bombas calorimétricas .....	46
Tabela 19 - Dados medições PCS .....	47
Tabela 20 - Dados fio de ferro.....	47
Tabela 21 - Massa de coco verde ao longo do tempo .....	49
Tabela 22 - Porcentagem de umidade .....	49
Tabela 23 - Rendimento gravimétrico carbonização .....	50
Tabela 24 - Análise de voláteis .....	50
Tabela 25 - Análise de umidade.....	51
Tabela 26 - Análise de cinzas .....	51
Tabela 27 - Resumo das análises imediatas e cálculo do carbono fixo.....	52
Tabela 28 - PCS experimental .....	53
Tabela 29 - Cálculos de PCS comparativos .....	54
Tabela 30 - Rendimentos energético e de carbono fixo .....	56
Tabela 31 - Resultados EDS amostra seca.....	62
Tabela 32 - Resultados EDS amostra carbonizada 200°C .....	64
Tabela 33 - Resultados EDS amostra carbonizada a 300°C .....	66
Tabela 34 - Resultados EDS amostra carbonizada a 500°C .....	68
Tabela 35 - Resultados EDS amostra carbonizada a 700°C .....	69
Tabela 36 - Concentrações de diferentes minerais encontrados na água de coco para diferentes períodos de maturação.....	70
Tabela 37 - Comparação entre a composição média das bebidas para o esporte (isotônicos) e a água-de-coco. ....	70

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Evolução da produção e área cultivada com coqueiros no mundo no período de 1970 a 2014. ....	4
Gráfico 2 - Área plantada e produção de coco no Brasil de 1990 a 2012. ....	5
Gráfico 3 - Produtividade média (mil frutos) dos coqueiros por região no Brasil no período de 1990-2012. ....	7
Gráfico 4 - Cronologia da perda de massa. ....	29
Gráfico 5 - PCS em função da temperatura de carbonização. ....	54
Gráfico 6 - Relação do PCS em função do teor de carbono fixo. ....	55
Gráfico 7 - Variáveis dependentes da temperatura. ....	57
Gráfico 8 - Efeito da temperatura na porosidade da casca de coco. ....	60

**LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS**

ha	hectare
t	tonelada
kg	quilograma
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAO	Food and Agriculture Organization of United Nations
AIE	Agência Internacional de Energia
bep	barril equivalente de petróleo
Mt	mega tonelada
g	grama
PCS	Poder calorífico superior
°C	graus Celsius
min	minuto
m <sup>3</sup>	metro cúbico
h	hora
p(X)	pressão do composto X
Q(X)	vazão do composto X
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
PCS <sub>v cte</sub>	Poder Calorífico Superior a volume constante
DRX	Difração de raio-x
CF	carbono fixo
V	voláteis
CN	cinzas
cal	caloria
kWh	Quilowatts hora
CC	Capacidade calorífica
Q	Quantidade de calor
m	massa
ΔT	diferença de temperatura

**LISTA DE SÍMBOLOS**

CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
B	boro
U	urânio
Na	sódio
K	potássio
Au	suro
Si	silício
Al	alumínio
Cl	cloro
Mg	magnésio
O	oxigênio
Ca	cálcio
C	carbono
KCl	cloreto de potássio
-OH	íon hidroxila
CO	monóxido de carbono
H <sub>2</sub>	gás hidrogênio
CH <sub>4</sub>	gás metano
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de ferro (III)
N <sub>2</sub>	gás nitrogênio

Sumário	
Lista de ilustrações .....	x
Lista de tabelas .....	xii
Lista de gráficos .....	xiii
Lista de abreviações e siglas .....	xiv
Lista de símbolos .....	xv
1 INTRODUÇÃO .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
2.1 Definição .....	8
2.2 Fontes de Biomassa .....	9
2.3 Usos .....	9
2.4 Biomassa e o meio ambiente .....	11
2.5 Resíduos .....	11
2.6 O coco verde .....	12
2.7 Carbonização .....	15
2.7.1 Torrefação .....	15
2.7.1.1 Propriedades da biomassa torrefeita .....	16
2.7.1.2 Aplicações da biomassa torrefeita .....	16
2.7.2 Pirólise .....	17
2.7.2.1 Influência da matéria-prima e dos parâmetros do processo .....	19
2.7.2.2 Tipos de pirólise .....	20
2.7.2.2.1 Pirólise lenta .....	21
2.7.2.2.2 Pirólise rápida .....	22
2.7.2.2.3 Pirólise ultrarrápida .....	22
2.8 Poder calorífico superior (PCS) .....	23
2.8.1 Definições .....	23
2.8.2 Aparelhagem .....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
3.1 Preparação inicial .....	26
3.2 Secagem .....	27
3.3 Moagem .....	30
3.4 Carbonização .....	32
3.5 Composição imediata .....	36
3.5.1 Teor de umidade .....	37
3.5.2 Teor de voláteis .....	39



3.5.3	Teor de cinzas .....	41
3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS .....	43
3.7	Poder calorífico superior (PCS).....	45
3.8	Difração de raio-x (DRX).....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
4.1	Secagem.....	49
4.2	Moagem.....	49
4.3	Carbonização.....	49
4.4	Composição imediata .....	50
4.4.1	Teor de voláteis .....	50
4.4.2	Teor de umidade .....	51
4.4.3	Teor de cinzas .....	51
4.5	Poder Calorífico Superior (PCS) .....	53
4.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS .....	58
4.7	Difração de raio-X (DRX) .....	70
5	CONCLUSÃO .....	72
6	BIBLIOGRAFIA.....	73
ANEXO	.....	75
Observações	.....	77

## 1 INTRODUÇÃO

O coqueiro, *Cocos nucifera*, é uma monocotiledônea pertencente à família Palmae. (ANDRADE e colab., 2004)

No Brasil, a produção se destina basicamente a produção de coco seco in natura e/ou na forma de produto industrializado (coco-ralado e leite de coco) com destaque para a produção de água de coco. O arranjo produtivo do coco verde brasileiro vem se consolidando, não só pelo aumento de áreas de plantios, com variedades apropriadas à produção de água, mas pelo crescimento do consumo da água de coco, impulsionados principalmente pela inclusão de hábitos saudáveis no comportamento da população brasileira.

O cultivo do coqueiro se destaca em muitos países não só pelos aspectos econômicos que proporciona, mas também pelos ganhos sociais e ambientais advindos da exploração sustentável da cultura. O avanço de técnicas de cultivo adequadas aos novos preceitos da sociedade vem possibilitando, principalmente em agro ecossistemas frágeis como em regiões de Mata Atlântica e zonas litorâneas, a inserção de pequenos produtores a melhores condições de vida em diversas regiões do mundo. Aproximadamente 90% da produção de coco do mundo advém de pequenos agricultores, com áreas de até 5 hectares, sendo que esta produção é praticamente consumida internamente, nos países produtores. No Brasil, cerca de 70% da exploração de coqueiro ocorre em propriedades de até 10 ha.

Nos últimos anos, a intensificação de áreas de cultivo e de produção é percebida em várias partes do mundo. No Brasil, o avanço da cultura ocorre não só pela evolução em patamares produtivos, que condicionam ao país lugar de destaque entre os maiores produtores mundiais, mas também, pela expansão da área cultivada, principalmente em regiões não tradicionais de cultivo. O cultivo de coqueiro no Brasil tradicionalmente acontece na região Nordeste, mas nos últimos trinta anos as áreas desse cultivo vêm tendo uma atenção especial em outras regiões do Brasil, principalmente no Sudeste, Centro Oeste e Norte do país.

Sendo o Brasil um dos maiores produtores mundiais de coco e, em particular a região Nordeste, destacando-se como um dos produtores nacionais (PIMENTA e colab., 2015), mas nos últimos trinta anos as áreas desse cultivo vêm tendo uma

atenção especial em outras regiões do Brasil, principalmente no Sudeste, Centro Oeste e Norte do país. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

O coco é cultivado em mais de 80 países com mais de 360 formas de aproveitamento, tanto in natura, quanto industrializado. (PIMENTA e colab., 2015). Cerca de 80% de toda a área plantada com coqueiro no mundo situa-se na Ásia, nos países da Índia, Filipinas, Indonésia, Sri Lanka e Tailândia, e o restante 20%, fica nos países Africanos, Latino Americanos, na Oceania e no Caribe. (MOTA e colab., 2015)

Atualmente, a produção está em torno de 60 milhões de toneladas em uma área colhida ao redor de 12 milhões de ha. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

O Brasil ocupa atualmente a quarta posição no ranking mundial de produção de coco verde, produzindo aproximadamente 2,8 milhões de toneladas em uma área colhida de 257 mil ha. (MOTA e colab., 2015)

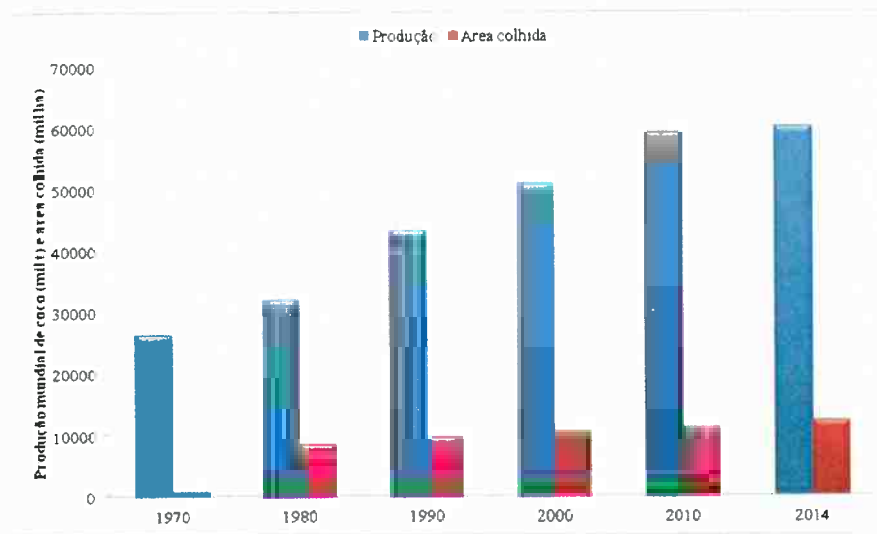
Na tabela abaixo é possível acompanhar com detalhes os dados relacionados com a produção:

*Tabela 1 - Produção, área colhida e produtividade dos principais países produtores de coco, em 2012.*

Pais	Área colhida (ha)	Produção (1.000 t)	Produtividade (1.000 t/ha)
Indonésia	3.000.000	18.000.000	6,00
Filipinas	3.573.806	15.862.386	4,44
Índia	2.132.240	10.560.000	4,95
Brasil	257.742	2.888.532	11,21
Sri Lanka	394.840	2.000.000	5,07
Vietnã	145.000	1.250.000	8,62
Tailândia	217.000	1.100.000	5,07
México	166.000	1.050.000	6,33
Papua Nova Guine	223.000	900.000	4,04
Malásia	112.093	606.530	5,41
Outros	1.892.920	5.831.389	3,08
Mundo	12.114.141,37	60.048.837,15	4,96

Fonte: FAO (2014).

Gráfico 1 - Evolução da produção e área cultivada com coqueiros no mundo no período de 1970 a 2014.



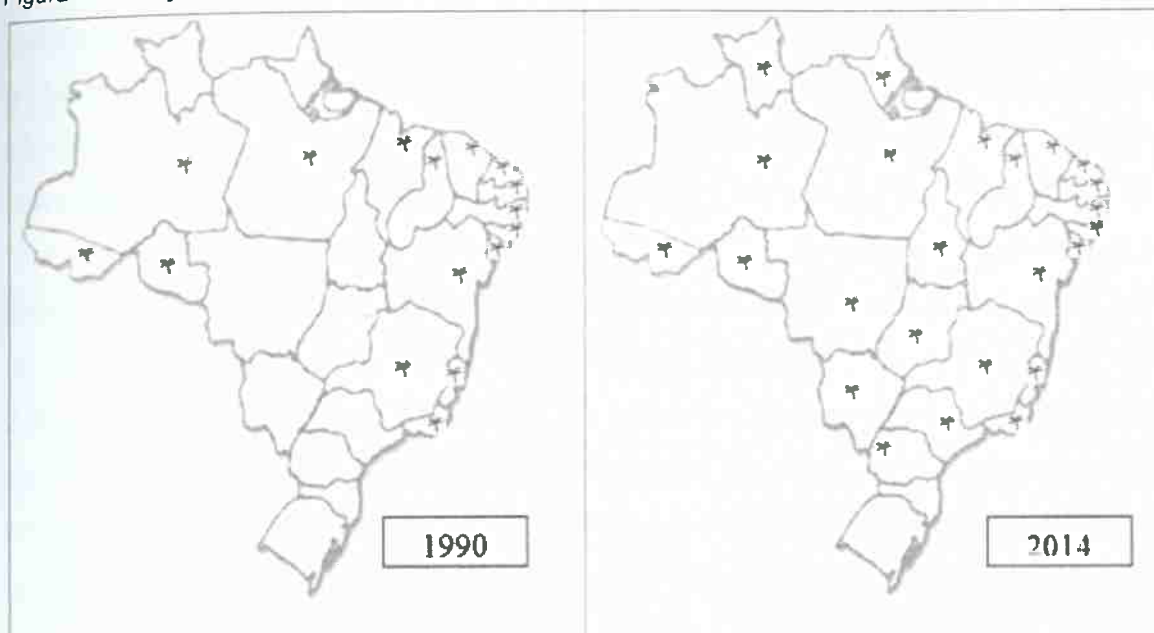
Fonte: FAO (2014).

O coqueiro, de um modo geral, foi introduzido no Brasil em meados de 1950 através do estado da Bahia, por isso da denominação coco-da-baía, com material proveniente da Ilha de Cabo Verde. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

Tem sua origem no sudeste asiático, nas ilhas entre os oceanos Índico e Pacífico. Acredita-se que, dessa região, o fruto do coqueiro tenha sido levado para a Índia e, em seguida, para o leste africano. Depois do descobrimento do Cabo de Boa Esperança, essa planta foi introduzida no oeste africano e, de lá, seguiu para as américas e para as demais regiões tropicais do globo terrestre. (ANDRADE e colab., 2004)

A partir da Bahia, o coqueiro disseminou-se pelo litoral nordestino, especialmente por ser uma frutífera típica de clima tropical onde encontrou condições favoráveis para cultivo e, posteriormente acabou se adaptando em outras regiões do país. Em 1990, o cultivo de coqueiro se restringia às regiões Norte e Nordeste. Nos dias atuais, o que se constata é o cultivo de coqueiros em quase todas as unidades da federação brasileira. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

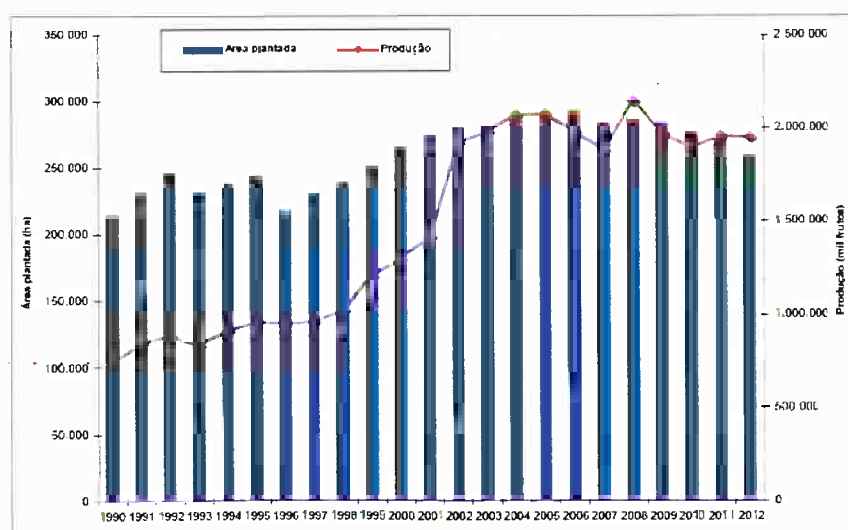
Figura 1 - Avanço do cultivo de coqueiros nos estados brasileiros em 1990 e 2014.



O estado da Bahia responde pela maior produção nacional, contribuindo com aproximadamente 26,56% da produção, o estado do Ceará fica na segunda colocação, com quase 14% da produção nacional. O nordeste brasileiro, talvez influenciado pelas características climáticas, figura como a região com maior produção, perfazendo cerca de 70% da produção no Brasil. (MOTA e colab., 2015)

Mesmo havendo incremento na área plantada desde 1990, o que se verifica é o aumento vertiginoso de produção a partir do final da década de 1990, como pode ser observado no gráfico abaixo. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

Gráfico 2 - Área plantada e produção de coco no Brasil de 1990 a 2012.



Fonte: IBGE (2014).

Apesar de o cultivo do coqueiro estar sendo estimulado e introduzido em várias regiões do país, as maiores plantações se concentram na faixa litorânea do Nordeste e parte da região Norte do Brasil. Favorecida pelas condições de tropicalidade climática, ambas as regiões detêm próximos dos 70% da área de produção do coco brasileiro. Essa situação de notoriedade em área e produção da fruta se reflete nas maiores cifras em termos de valor da produção. Entretanto, essa relação é inversamente proporcional quando se analisa a conversão equivalente área no valor de produção alcançado, ou seja, a taxa de conversão é de 2,7 para a Região Nordeste, 3,8 para a Norte, 8,9 para a Sudeste, 10,17 para a Centro Oeste e de 12,55 para a região Sul. Mesmo alcançando os maiores valores da produção na Região Nordeste, comparativamente à área, as demais regiões apresentam um valor bruto da produção que remete a maior valorização pelo mercado consumidor. A evolução brasileira na produção de frutos ocorre obviamente pelo acréscimo das áreas de cultivo, mas principalmente pelo incremento tecnológico na condução e manejo dos coqueirais em quesitos como adubação, sistemas intensivos de cultivos, variedades melhoradas de coqueiros do tipo Anão e híbridos, que conjuntamente propiciaram aumento da produtividade e avanço do cultivo de coqueiros em novas fronteiras agrícolas. (MARTINS e JUNIOR, 2014)

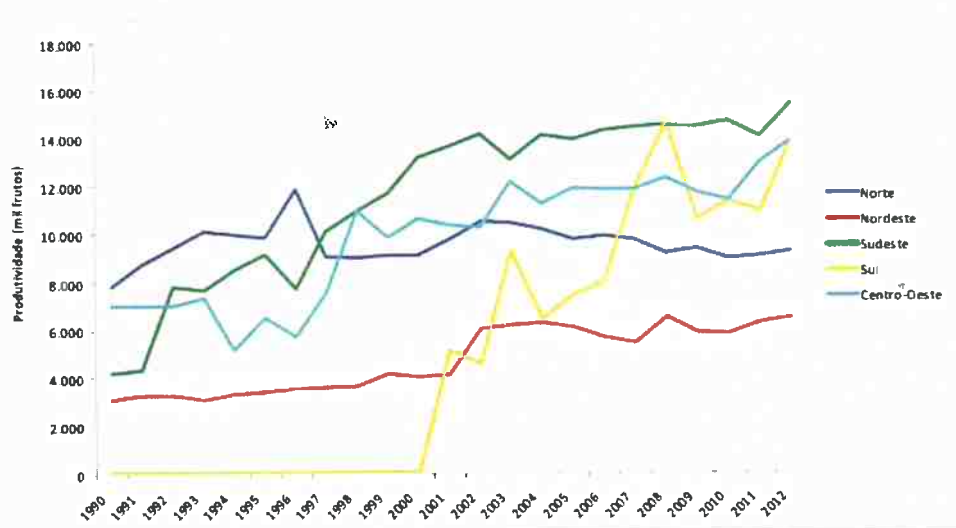
De modo mais ilustrativo é possível acompanhar a evolução de cada uma das regiões na produção do coco verde com mais detalhes na tabela e no gráfico abaixo:

Tabela 2 - Produção de coco verde no Brasil em 2010.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Área Destinada a Colheita (há)	Área Colhida (há)	Quantidade Produzida (t)	Rendimento Médio (kg/há)	Valor da Produção (1000 R\$)
<b>Brasil</b>	<b>276.616</b>	<b>274.773</b>	<b>1.891.687</b>	<b>6.885</b>	<b>788.584</b>
<b>Norte</b>	<b>28.468</b>	<b>27.414</b>	<b>254.673</b>	<b>9.290</b>	<b>82.186</b>
Amazonas	3.299	2.263	8.875	3.922	7.149
Pará	23.935	23.935	232.073	9.696	6.994
Tocantins	786	786	11.244	14.641	6994
<b>Nordeste</b>	<b>224.095</b>	<b>223.368</b>	<b>1.294.075</b>	<b>5.793</b>	<b>534.512</b>
Ceará	44.093	44.090	263.684	5.981	104.631
Rio Grande do Norte	22.552	22.541	62.417	2.769	24.656
Paraíba	11.454	11.454	63.267	5.524	26.716
Pernambuco	10.761	10.059	71.346	7.093	23.548
Alagoas	12.576	12.576	55.320	4.399	24.551
Sergipe	41.890	41.890	253.621	6.054	98.068
Bahia	76.985	76.985	502.364	6.525	221.656
<b>Sudeste</b>	<b>20.296</b>	<b>20.236</b>	<b>299.637</b>	<b>14.807</b>	<b>141.276</b>
Espírito Santo	10.002	10.002	149.899	14.987	57.722
Rio de Janeiro	4.426	4.426	74.077	16.737	38.344
<b>Sul</b>	<b>202</b>	<b>200</b>	<b>2.282</b>	<b>11.410</b>	<b>28.993</b>
Paraná	202	200	2.282	11.410	28.993
<b>Centro-Oeste</b>	<b>3.555</b>	<b>3.555</b>	<b>41.020</b>	<b>11.539</b>	<b>28.993</b>
Mato Grosso	1.757	1.757	20.451	11.640	17.335
Goiás	1.328	1.328	16.016	12.060	8.333

Fonte: IBGE (2010).

Gráfico 3 - Produtividade média (mil frutos) dos coqueiros por região no Brasil no período de 1990-2012.



Fonte: IBGE (2014).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Definição

Do Instituto de Energia e Ambiente da USP (IEE), temos a definição de biomassa:

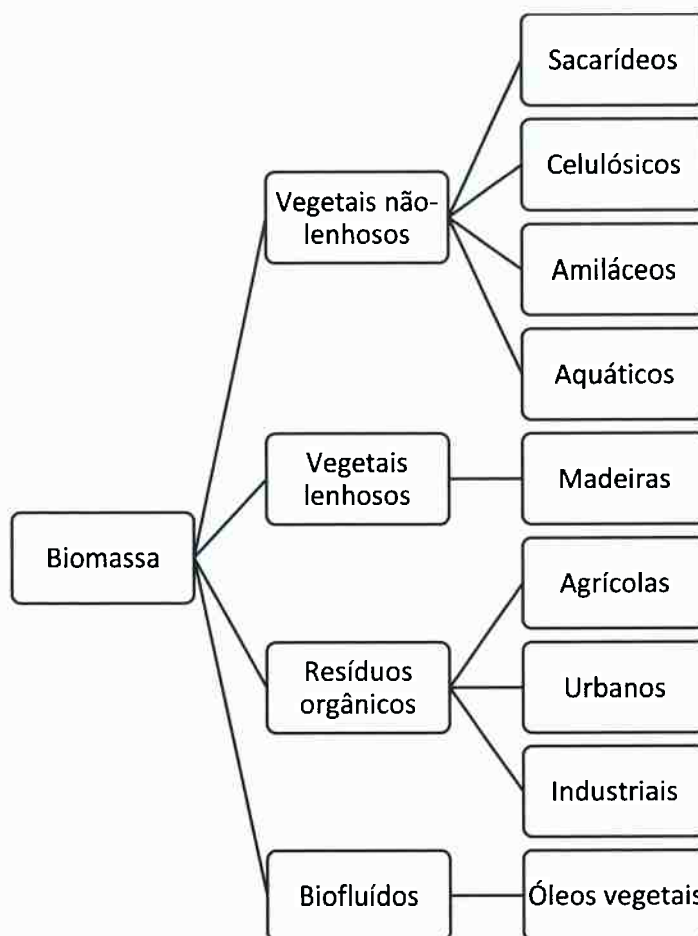
*“Do ponto de vista energético, o conceito geral é que biomassa seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia.*

*Como nos combustíveis convencionais, a energia contida na biomassa é energia química associada com os átomos de carbono e hidrogênio contidos nas moléculas orgânicas oxidáveis. Para organização e assimilação dessas moléculas orgânicas e conseqüente produção de biomassa vegetal, ocorre na natureza a conversão do dióxido de carbono e da água para uma forma de combustível orgânico. Este processo é chamado de fotossíntese.”*



## 2.2 Fontes de Biomassa

Figura 2 - Fontes de biomassa



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 1982.

## 2.3 Usos

Apenas há pouco mais de 100 anos a biomassa começou a perder cada vez mais sua liderança histórica para a energia do carvão, e depois, com o crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas.

Porém hoje, em maior ou menor intensidade, a maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. A motivação para essa mudança de postura é a necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, a redução no consumo

de derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa.

A utilização da biomassa como fonte de energia é uma das opções para se mitigar os malefícios do aquecimento global. Esta biomassa pode ser obtida por duas rotas principais, culturas energéticas ou resíduos lignocelulósicos provenientes de atividades agroflorestais, enquanto a segunda forma oferece a vantagem de destinar adequadamente materiais potenciais poluidores do meio ambiente. (PROTÁSIO e colab., 2012)

As primeiras biomassas no Brasil são: resíduos vegetais, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos animais e resíduos florestais: Os resíduos vegetais são produzidos no campo, derivados das atividades da colheita dos produtos agrícolas. Os resíduos agrícolas são constituídos de palha, folhas e caules. Os resíduos sólidos urbanos são resultantes das atividades domiciliares e comerciais. Já os resíduos industriais, são aqueles provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico e do gás de alto-forno a carvão vegetal. (FROEHLICH e colab., 2012)

Analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir a demanda energética tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

Quando se busca determinar a disponibilidade energética em um país ou região é importante considerar as restrições de ordem ecológica, econômica (incluindo social e política) e tecnológica. Somente assim toda a biomassa potencialmente disponível (recurso) pode assumir o conceito de reserva, a partir do qual se determina o potencial anual de produção. As restrições ecológicas estão associadas à preservação do meio ambiente e à qualidade de vida. As limitações econômicas são analisadas em dois níveis. Em primeiro lugar é necessário saber se a biomassa a ser explorada energeticamente não tem outros usos mais econômicos (industrial e alimentício). Em segundo lugar, se todos os custos da biomassa explorada são compatíveis com os benefícios energéticos e comparáveis com os demais combustíveis. Finalmente, as restrições tecnológicas se devem à existência ou não de processos confiáveis e operações para a conversão da biomassa em combustíveis de uso mais geral. O álcool combustível da cana-de-açúcar no Brasil é o principal exemplo da produção em

grande escala de energia da biomassa, e que ainda tem um interessante crescimento pela frente. Outros exemplos são o aproveitamento do biogás na China, o aproveitamento do bagaço de cana nas Ilhas Maurício e atualmente no Brasil, e o coque vegetal também no Brasil.

Existe atualmente grande esforço em nível mundial no que concerne ao futuro da energia do planeta. Muitas pesquisas com o objetivo principal de descobrir novas formas de energia e também novos modos de produção estão em realização. Por questões econômicas, políticas e ambientais, o panorama mundial está mudando. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

#### **2.4 Biomassa e o meio ambiente**

Atualmente no Brasil as questões ambientais estão sendo tratadas de forma mais rigorosa comparadas ao passado. (FROEHLICH e colab., 2012)

A Agência Internacional de Energia (AIE) calcula que dentro de aproximadamente 20 anos cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis, que hoje representam 14% da energia produzida no mundo, em que a biomassa tem 11,4% na participação da oferta.

A biomassa é um bem que pode ser renovado infinitamente pelo plantio e o petróleo, não. Dentro desse contexto, vislumbra-se uma tendência estratégica do crescimento da biomassa como substituta do petróleo. (TEIXEIRA DO VALE, AILTON; GENTIL, LUIZ VICENTE; GONÇALEZ, JOAQUIM CARLOS; FLORIAN DA COSTA, 2007)

O Brasil apresenta vantagens climáticas e geográficas para a utilização de recursos naturais para uso energético. Em 2016, as fontes renováveis representaram 41,2% da oferta interna de energia nacional. (PADILLA e colab., 2018)

#### **2.5 Resíduos**

Resíduos devem ser entendidos como efluentes líquidos, emissões atmosféricas e resíduos sólidos. (FROEHLICH e colab., 2012)

A Secretaria do Meio Ambiente - SEMA conceitua resíduos sólidos como os restos das atividades humanas, consideradas pelos gestores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Apresentam-se geralmente sob estado sólido, semissólido ou semilíquido. Podem ser classificados por sua natureza física: seco e

molhado; por sua composição química: matéria orgânica e matéria inorgânica; e pelos riscos potenciais ao meio ambiente: perigosos, não inertes e inertes.

Resíduos da produção agroindustrial podem ser utilizados como matérias-primas para a geração de calor e eletricidade. Mesmo com a liberação de CO<sub>2</sub> na queima, estes materiais durante seu crescimento e desenvolvimento, promovem a fixação deste gás, representando menor dano ao meio ambiente.

Outros resíduos importantes são os resíduos sólidos urbanos e industriais, que estão sendo utilizados em alguns países devido a seu avanço tecnológico. Mas é difícil desenvolver uma análise relevante em âmbito mundial, dado que sua natureza compreende muitos materiais orgânicos e não-orgânicos, e a proporção da composição dos resíduos varia de acordo com o nível econômico e o desenvolvimento industrial de cada país, e também pelos diversos destinos desses resíduos.

Biomassa tem origem em resíduos sólidos urbanos, sejam eles, animais, vegetais, industriais e florestais, e que são voltados para fins energéticos, abrange a utilização desses diversos resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. Biomassa é um material constituído por substâncias de origem orgânica (vegetal, animal e micro-organismos). Plantas, animais e seus derivados são biomassa. A utilização desses materiais como combustível pode ser feita a partir de sua forma bruta, como madeira, produtos e resíduos agrícolas, resíduos florestais, resíduos pecuários, excrementos de animais e lixo. (FROEHLICH e colab., 2012)

O aproveitamento dos resíduos pode trazer alguns benefícios financeiros às empresas madeireiras, como: menores gastos com matéria-prima, energia e disposição dos resíduos; redução ou eliminação de custos futuros decorrentes de processos de despoluição causados por esses resíduos; menores complicações legais, com o não pagamento de multas ambientais; menores custos operacionais de manutenção; menores riscos atuais e futuros à funcionários, público e meio ambiente e, conseqüentemente, menores despesas. (FROEHLICH e colab., 2012)

## **2.6 O coco verde**

Aproximadamente 85% da produção brasileira de coco é comercializada como coco seco: a metade é para uso culinário e o restante é industrializado, obtendo-se uma série de produtos como leite, sabão, óleo etc. Cerca de 15% da produção é consumida ainda verde para extração de água que também é industrializada. Dessa

forma, tem-se uma quantidade muito elevada de cascas de coco ainda tratadas como resíduo, sendo que na realidade constituem matéria-prima em potencial. O aproveitamento dos resíduos de coco contribui para a preservação do ambiente, uma vez que, ao serem descartados, estes demoram oito anos para se decompor na natureza. (PIMENTA e colab., 2015)

Do coco verde, cerca de 80% a 85% do peso bruto do coco é representado pela casca, sendo o restante a parte aproveitável, compreendida pelo albúmen e água do coco. (MOTA e colab., 2015)

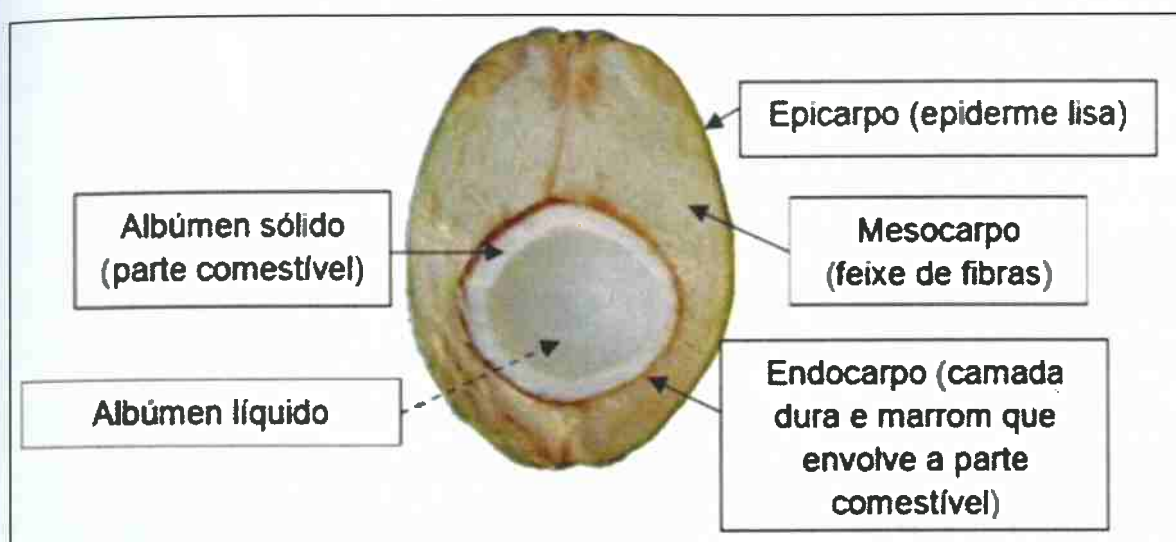
Cascas de coco têm pouco ou nenhum valor econômico e seu descarte não é apenas caro, mas também pode causar problemas ambientais. (LI e colab., 2008)

O fruto descartado, normalmente, é depositado nos aterros e nos denominados lixões. Isso tem provocado um significativo aumento nos serviços municipais de coleta, transporte e deposição de lixo em função, principalmente, do grande volume que representa. Devem-se considerar, também, a necessidade de grandes espaços nos vazadouros, o longo tempo de decomposição desse material (8 a 12 anos), os efeitos deletérios à paisagem urbana e os possíveis impactos negativos ao ambiente. (ANDRADE e colab., 2004)

A biomassa gerada pela produção de coco verde, como foi demonstrado, é um grande problema para o governo, principalmente governo de cidades litorâneas, onde o consumo da água de coco é elevado. Alguns pesquisadores, assim como órgãos, como a Embrapa estudam meios de empregar a biomassa do coco verde (epicarpo, mesocarpo e endocarpo) de forma correta, sem prejudicar o meio ambiente.

Seu fruto é, botanicamente, uma drupa, formada por uma epiderme lisa ou epicarpo, que envolve o mesocarpo espesso e fibroso. No interior do fruto há uma camada fina, muito dura, marrom, denominada endocarpo. Abaixo do endocarpo, recobrimo o albúmen sólido (castanha), encontra-se uma membrana de coloração marrom, chamada tegumento. O albúmen sólido é uma camada carnosa, branca, muito oleosa, que forma uma grande cavidade onde se encontra a água de coco, que é o albúmen líquido. (VALE, Ailton Teixeira Do e QUIRINO, 2004)

Figura 3 - Corte longitudinal do coco, com as suas partes.



Fonte: Benassi, 2006

Estima-se que 70% de todos os resíduos gerados nas praias brasileiras sejam cascas de coco verde. (PADILLA e colab., 2018)

Um dos maiores problemas encontrados nas grandes praias brasileiras diz respeito ao grande acúmulo de resíduos sólidos, principalmente os gerados pelo consumo de água de coco verde (*Cocos nucifera*). Estima-se que esse aumento gera 6,7 milhões de toneladas de casca/ano, tornando-se um sério problema ambiental. Quando depositados de forma inadequada, os resíduos sólidos podem causar mau cheiro, degradar a paisagem, colocar em risco o meio ambiente e contribuir para a proliferação de mosquitos transmissores de doenças. Somente em São Paulo, nos últimos anos, a produção de coco foi incrementada em 68%, sendo que esse consumo pode ser refletido no aumento do consumo de água de coco, que representa 1,4% do consumo de bebidas no Brasil. Devido a esses e outros problemas referentes ao aumento no consumo de água de coco verde, encontra-se na literatura vários trabalhos relatando maneiras diferentes de se utilizar os resíduos do coco. Essas medidas são necessárias, visto que o consumo de coco tende a crescer cada vez mais, influenciado pelas características climáticas e turísticas do país.

No Brasil, apenas 10% das cascas de coco são aproveitadas pelas indústrias, sendo o restante desperdiçado. (VALE, Ailton Teixeira Do e QUIRINO, 2004)

Outra grande aplicação que pode ser dada ao resíduo gerado pela produção de coco verde é na produção de energias renováveis. É de conhecimento geral que o

Brasil figura como o país que possui o maior percentual de energia renovável em sua matriz energética, cerca de 40%. A biomassa gerada pelas cascas do coco pode ser utilizada na produção do bio-óleo, carvão vegetal ou gás combustível por intermédio do processo termoquímico de pirólise. (MOTA e colab., 2015)

Além disso, uma outra maneira de se evitar/reduzir o efeito negativo desses resíduos ao ambiente poderia ser a reciclagem dos mesmos, como por exemplo, sua utilização na agricultura, na forma de substratos para a produção de mudas, método que utiliza a casca de coco verde. O aproveitamento da casca de coco verde é viável para essa aplicação por serem suas fibras quase inertes e terem alta porosidade, facilidade de produção, baixo custo e alta disponibilidade. (PIMENTA e colab., 2015)

Existem algumas formas de aproveitamento do resíduo do coco, dentre as quais se destacam: as fibras do mesocarpo, com os seus diferentes comprimentos, servem para a produção de uma gama de produtos, como vestuário, sacarias, almofadas, colchões, acolchoados para a indústria automobilística, escovas, pincéis, cordas marítimas, cortiça isolante, xaxim (“coxim”) para o cultivo de plantas etc. O endocarpo pode ser utilizado na produção de carvão para desodorização e ativado. É possível a obtenção de compósitos a partir da mistura de PET reciclado e fibras de coco, com propriedades que permitem a sua utilização em vários setores. Outras formas de aproveitamento do resíduo do coco, que estão sendo aprimoradas no Estado do Rio de Janeiro, são: a produção de vasos, placas, tutores, substratos, adubo orgânico e material para isolamento termo acústico, sem a utilização de látex. Em virtude das suas propriedades físicas e químicas, o coco verde residual pode ser queimado diretamente em fornalhas ou aproveitado para a produção de carvão vegetal. (ANDRADE e colab., 2004)

## **2.7 Carbonização**

### **2.7.1 Torrefação**

A torrefação de biomassa desenvolve-se entre cerca de 220°C e 300°C. Nessas condições, a umidade é removida e a hemicelulose degradada, provocando a liberação de ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico. A lignina e a celulose também sofrem ligeira despolimerização. O rendimento da conversão varia entre 60% e 80% em função das condições de

temperatura em que se realiza o processo. O material resultante apresenta características intermediárias entre o carvão e a biomassa original. O processo de torrefação tem como objetivo concentrar a energia da biomassa em curto tempo e obter altos rendimentos, operando a baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido denominado biomassa torrefeita ou torrificada.

Durante a torrefação podem ser identificados dois tipos de reações, classificadas em reações de termocondensação e carbonização. Recomenda-se que a torrefação seja executada em atmosfera neutra ou redutiva, para inibir a oxidação ou ignição do material. A expressão "termocondensação" indica o processo no qual um material lenhocelulósico é submetido a reações químicas acompanhadas de eliminação de água e com eventuais reações de descarboxilação interna.

#### 2.7.1.1 Propriedades da biomassa torrefeita

As propriedades da biomassa torrefeita variam em função do tempo e da temperatura de processamento. Para cada combinação dessas variáveis, podem-se obter produtos de diferentes propriedades energéticas, pois os teores de voláteis e carbono fixo variam em função de cada combinação realizada. O padrão comum é caracterizado por:

- a) Hidrofobia – Devido a transformações de caráter físico-químico, a reabsorção de umidade é praticamente nula durante a armazenagem. A umidade de equilíbrio se estabiliza em torno de 3%;
- b) Alta densidade energética – Os voláteis de alto teor energético são conservados no solo.

#### 2.7.1.2 Aplicações da biomassa torrefeita

O controle dos parâmetros de torrefação permite que possam ser produzidos combustíveis para diferentes propósitos. São várias as aplicações práticas, por exemplo:

- a) Combustíveis industrial e doméstico – O fato de a biomassa torrefeita possuir baixas emissões de fumaça durante a combustão, além de poder ser estocada por longos períodos, facilita seu uso doméstico. Industrialmente, pode ser utilizada para produção de eletricidade através



da queima em caldeiras para a produção de vapor e também na co-combustão com carvão mineral, o que traria benefícios ambientais, pela redução de emissões de dióxido de enxofre;

- b) Redução – Devido às características peculiares da madeira torrefeita, ela apresenta potencialidade para ser aplicada como redutor na indústria eletrometalúrgica;
- c) Gaseificação – Devido ao alto grau de padronização da madeira torrefeita, sua utilização nos gasogênios facilita a regulação e otimização desses equipamentos.

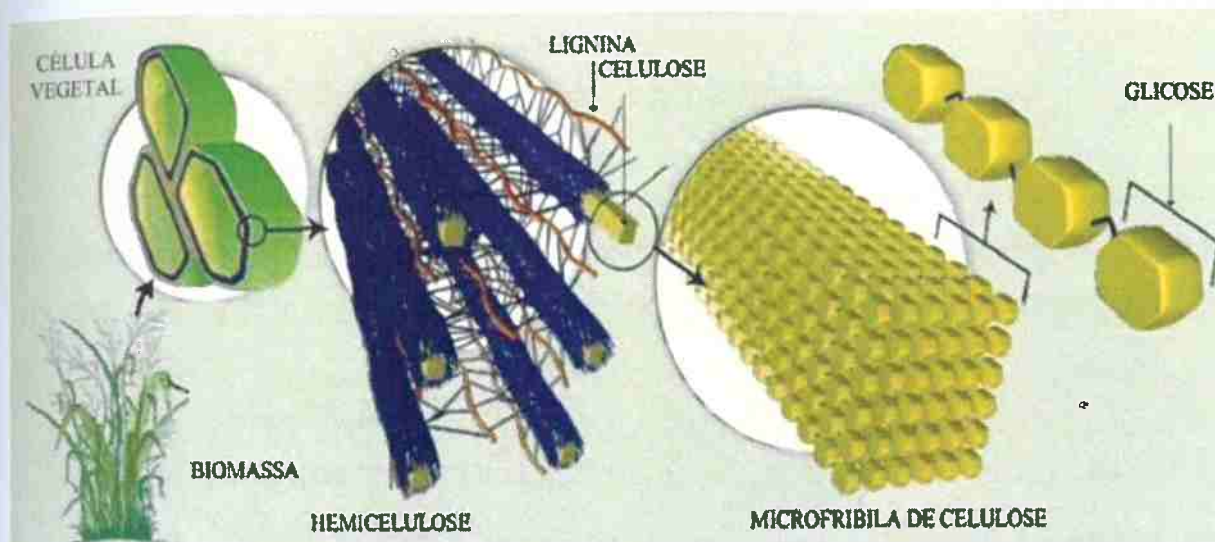
### 2.7.2 Pirólise

A pirólise tem sido empregada por milhares de anos para produção de carvão, mas somente nos últimos 30 anos, por intermédio de equipamentos mais sofisticados onde se pôde trabalhar com moderadas temperaturas e tempos de reações muito curtos, é que o processo ganhou realmente interesse dos pesquisadores. A pirólise surgiu conceitualmente no século passado, por volta de 1897, quando Max Planck demonstrou que há uma conexão fechada entre o conceito de irreversibilidade e a segunda lei da termodinâmica. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

Trata-se de um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (300°C-800°C) em atmosfera não-oxidante. Ocorre a degradação da biomassa por meio do aquecimento, na qual ocorre a formação de três produtos, são eles: carvão, óleo e gás pirolítico (licor pirolenhoso), e dependendo das condições no reator, dos parâmetros do processo e das características do material tratado, um destes produtos pode ser maximizado. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

O processo de pirólise consiste em um conjunto de complexas reações químicas acompanhadas de processos de transferência de calor e de massa. A composição heterogênea das frações produzidas e as possíveis interações entre si tornam ainda mais complexo o processo. As reações que incidem diretamente sobre o substrato celulósico são denominadas reações primárias e aquelas que incidem na decomposição dos produtos intermediários, tais como vapores orgânicos e levoglucosan, são denominadas reações secundárias. Essas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa: a hemicelulose, a celulose e a lignina.

Figura 4 - Principais componentes da biomassa lignocelulósica



Fonte: (DE ASSIS DA e colab., 2015)

O processo de pirólise se desenvolve, basicamente, em três etapas principais. A primeira ocorre entre a temperatura ambiente e 180°C. Nessa etapa, a biomassa absorve calor, liberando a umidade em forma de vapor de água e apresentando um caráter fortemente endotérmico. Entre 110°C e 180°C ocorrem reações de desidratação que envolvem os grupos -OH presentes nas moléculas dos polissacarídeos.

A segunda etapa ocorre entre 180°C e 370°C, quando começam as reações propriamente de pirólise. Entre 180°C e 290°C ocorre a degradação da hemicelulose, sendo parcialmente degradadas a celulose e lignina. Nessa faixa de temperaturas ocorre formação do composto intermediário levoglucosan e são liberadas moderadas quantidades de CO, CO<sub>2</sub> e ácido acético na forma de voláteis. As reações tornam-se exotérmicas a partir dos 250°C. Aos 290°C é alcançada a máxima taxa de degradação da hemicelulose e, entre 290°C e 370°C, ocorre a degradação total da celulose atingindo a máxima taxa aos 370°C. Nessa fase ocorre a quebra das ligações glicosídicas dos polissacarídeos, dando lugar a uma grande emissão de voláteis, compostos por vapores orgânicos e altas concentrações de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, verificando-se grande formação de ácido acético, metanol e acetona. O alcatrão começa a se tornar predominante com o aumento da temperatura.

A terceira etapa desenvolve-se acima de 370°C, quando se completa a degradação da lignina, ocorrendo a formação dos alcatrões pesados e a formação de

alguns hidrocarbonetos. A degradação da lignina é responsável pela formação de cerca de 50% do carbono fixo no material sólido.

### 2.7.2.1 Influência da matéria-prima e dos parâmetros do processo

O tipo de biomassa e os parâmetros do processo têm influência decisiva no tipo de produto resultante e nas proporções das frações sólidas, líquidas e gasosas obtidas. Os principais parâmetros que têm influência direta nos resultados do processo são:

- a) Temperatura;
- b) Tempo de residência;
- c) Taxa de aquecimento;
- d) Pressão;
- e) Tipo de atmosfera;
- f) Uso de catalisadores.

No caso da temperatura, à medida que ela aumenta, o teor de carbono aumenta proporcionalmente e os teores de oxigênio e hidrogênio diminuem ostensivamente. Como consequência da destilação intensa promovida pelo aumento da temperatura, o rendimento da fração sólida diminui de forma substancial. Entretanto, o poder calorífico superior (PCS) aumenta com a concentração de carbono na composição sólida.

Tabela 3 - Características dos processos para diferentes tipos de pirólises

	Taxa de Aquecimento	Tempo de Resistência da Biomassa	Produtos Característicos
Pirólise Lenta	Lenta	Alto	Carvão
Pirólise Rápida	Rápida	Baixo	Bio-óleo
Pirólise Ultrarrápida	Muito Rápida	Muito Baixo	Gases

Fonte: (DE ASSIS DA e colab., 2015)

Tabela 4 - Relação das quantidades obtidas dos produtos pirolíticos para os diferentes processos

	QUANTIDADE PRODUZIDA		
	Carvão	Bio-óleo	Gases
Pirólise Lenta	Alto	Médio	Baixo
Pirólise Rápida	Baixo	Alto	Médio
Pirólise Ultrarrápida	Muito Baixo	Baixo	Alto

Fonte: (DE ASSIS DA e colab., 2015)

A taxa de aquecimento também tem influência direta no processo. Quanto a pirólise ocorre com o aumento muito rápido da temperatura, as reações químicas favorecem a formação de frações voláteis (gases e líquidos). Por outro lado, quando o aquecimento ocorre de forma gradual, as reações favorecem a formação de frações sólidas (carvão vegetal).

O aumento da pressão no reator pirolítico também favorece altos rendimentos de sólidos e reduz consideravelmente as frações gasosas.

As características finais dos produtos obtidos também dependem, em grande parte das propriedades físico-químicas da matéria prima utilizada, por exemplo, a maior parte das frações voláteis que são formadas a partir da celulose e da hemicelulose. Por outro lado, a lignina contribui para a formação de cerca de 50% do carbono fixo na fração sólida. Portanto, materiais com alto teor de lignina são mais apropriados para a obtenção de alta concentração de carbono fixo na fração sólida. Outro fator importante é a granulometria, que influencia diretamente nos tipos de reações, por exemplo, em pedaços muito grandes de madeira, os voláteis permanecem no interior do sólido por um período no qual são favorecidas as reações secundárias, enquanto nas partículas menores os voláteis são eliminados rapidamente do interior do sólido, favorecendo a ocorrência das reações primárias. (2008, BIOMASSA para energia, p. 334-335)

#### 2.7.2.2 Tipos de pirólise

Um dos processos mais antigos de pirólise é a “carbonização” (geralmente utilizado com madeira), o qual se caracteriza pelo uso de baixas taxas de aquecimento com o objetivo de maximizar a produção de carvão vegetal. Outro processo comumente realizado é chamado “destilação seca” ou “destrutiva”, em que se empregam taxas de aquecimento maiores e se procura maximizar a produção de líquidos. Assim, até o século passado, buscava-se o carvão vegetal para uso doméstico e como componente de tintas e remédios. Posteriormente, começou a ser utilizado na siderurgia, como redutor de  $Fe_2O_3$  na produção de aços. No início do século XX, a destilação (em retortas) da madeira tornou-se uma importante fonte de metanol, ácido acético e acetona, colocando o carvão vegetal como subproduto desses processos.

Em épocas contemporâneas, verifica-se um interesse crescente no desenvolvimento de formas diferentes de pirólise. Com o estudo dos mecanismos da pirólise sugeriu-se a modificação substancial das proporções de gases, líquidos e sólidos produzidos através do aumento das taxas de aquecimento e variações da temperatura final de pirólise, o que resulta nas pirólises rápida, flash e ultrarrápida, que proporcionam altos rendimentos de líquidos (bio-óleo), acima de 70% em escala laboratorial. Esses processos envolvem taxas de aquecimento muito altas, combinadas com temperaturas em torno de 650°C e curtos tempos de residência com rápido resfriamento dos produtos líquidos. A rápida reação minimiza a formação de carvão e, sob severas condições, aparentemente o carvão não é formado. A temperaturas maiores, maximiza-se a produção de gases. A pirólise, sob essas condições, é classificada em pirólise rápida, flash e ultrarrápida, de acordo com as taxas de aquecimento e tempos de residência empregados. Podem ser realizados processos utilizando atmosferas inertes (por exemplo, nitrogênio e vácuo) ou reativas, como, por exemplo, hidrogênio (hidropirólise) e metano (metapirólise). Nesses casos, variam os produtos obtidos, em geral, conseguem-se compostos com menor teor de oxigênio e melhores propriedades para serem utilizados como combustíveis ou produtos químicos.

Tabela 5 - Versões da tecnologia de pirólise

Processo de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura máxima (°C)	Principais produtos
Carbonização	horas-dias	muito pequena	400	Carvão vegetal
Convencional	5-30min	pequena	600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0.5-5s	intermediária	650	Bio-óleo
Flash pirólise	<1s	alta	<650	Bio-óleo e gás
Ultrarrápida	<0.5s	muito alta	1000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2-30s	intermediária	400	Bio-óleo
Hidropirólise	<10s	alta	<500	Bio-óleo e produtos químicos
Metanopirólise	<10s	alta	>700	Produtos químicos

### 2.7.2.2.1 Pirólise lenta

A pirólise lenta ou convencional é composta por sistemas conhecidos como "carvoarias" ou sistemas contínuos com aquecimento lento da biomassa acima de 400°C na ausência de oxigênio. Neste processo a biomassa é pirolisada com baixas taxas de aquecimento, cerca de 5 a 7°C/min, onde os produtos líquidos e gasosos são

mínimos e a produção de carvão é maximizada. A pirólise lenta de madeira, com tempo de resistência de 24 horas, foi uma tecnologia muito comum nas indústrias até o início dos anos 1900, onde eram obtidos como principais produtos o carvão, ácido acético, metanol, e etanol a partir da madeira. A pirólise lenta caracteriza-se por taxas de aquecimentos pequenas e faixa máxima de temperatura em torno de 600°C e tempo de permanência da biomassa no reator está entre 5-30 min, obtendo como principais produtos o bio-óleo, carvão e gases. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

#### 2.7.2.2.2 Pirólise rápida

A pirólise rápida é um dos métodos mais promissores para a conversão energética da biomassa em produto líquido. O óleo de pirólise (bio-óleo) produzido é um combustível de energia densa intermediária, que pode ser melhorado para hidrocarbonetos no diesel e gasolina. Na pirólise rápida, a biomassa é decomposta muito rapidamente, gerando principalmente vapores e aerossóis e um pouco de carvão e gás. Após o resfriamento e condensação, um líquido castanho escuro móvel homogêneo é formado e possui um poder calorífico correspondente a metade do óleo combustível convencional. A tecnologia de pirólise rápida é empregada mundialmente em grande escala para produção de líquidos (bio-óleos), a tecnologia é objetivo de estudo de grandes pesquisadores em biocombustíveis. Vários reatores são utilizados no processo de pirólise rápida, dentre eles, temos o reator de fluxo arrastado, reator de forno a vácuo, reator de vórtice, reator rotativo, reator de leito fluidizado borbulhante, etc., muitos pesquisadores têm contribuído no campo da pirólise usando um desses reatores. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

#### 2.7.2.2.3 Pirólise ultrarrápida

A pirólise ultrarrápida tem como principais características altíssimas taxas de aquecimento (200 a 1000°C/min) e tempo muito baixo de resistência da biomassa no reator. Estas características favorecem a produção de vapores e torna o processo bastante parecido com a gaseificação. Devido à alta taxa de aquecimento, onde os tempos de resistência da biomassa são de apenas alguns segundos, necessita-se de reatores que atendam essas necessidades de aquecimento. Esses reatores são o de leito fluidizado e de fluxo arrastado. O reator de leito fluidizado é empregado na

execução de reações químicas multifásicas, onde se emprega um catalizador, geralmente areia, funcionando a mesma com um fluido dentro do processo. A pirólise ultrarrápida para produção de carvão envolve o aquecimento da biomassa sob moderada a alta pressão numa retorta, neste caso particular, o rendimento de carvão chega a 60% e voláteis (bio-óleo e gás de síntese) a 40 %, esta tecnologia é mais propensa a utilizar equipamentos de recuperação de calor. (DE ASSIS DA e colab., 2015)

## 2.8 Poder calorífico superior (PCS)

O poder calorífico de um combustível (PC) é a quantidade de calor desprendida quando se queima completamente a unidade de massa desse combustível sob determinadas condições.

Não é possível medir diretamente essa quantidade de calor desprendida, mas este calor provoca um aquecimento num certo sistema conhecido (recipiente calorimétrico) e fornece uma diferença de temperatura na água nele contida ( $\Delta T$ ). Na bomba calorimétrica uma certa massa de combustível é queimada, obtendo-se  $\Delta T$ . Conhecido  $\Delta T$  e a capacidade calorífica (CC) do calorímetro (quantidade de calor necessária para aquecer o aparelho de 1° C), é fácil obter o PC. Sendo Q a quantidade de calor desprendida pela combustão da massa m:

$$Q = m P_c = CC \Delta T \quad (1)$$

$$P_c = \frac{CC \Delta T}{m} \quad (2)$$

Desde que o calorímetro não sofra alterações, sua capacidade calorífica permanece constante e ela pode ser determinada pela combustão de uma substância de PC bem conhecido (normalmente ácido benzoico), medindo-se a elevação de temperatura da água do recipiente calorimétrico. Calcula-se C através da equação (2).

Na determinação do PC de combustíveis sólidos ou líquidos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) manda seguir as normas ASTM (American Society for Testing Materials) nº D 407-44, D 271-58 e D 240-57 T.

### 2.8.1 Definições

De acordo com a ASTM, tem-se:

Poder Calorífico Superior em Volume Constante ( $PCS_{V_{cte}}$ ): É a quantidade de calor produzida pela queima completa da unidade de massa de um combustível sólido ou líquido em volume constante, dentro de uma bomba calorimétrica contendo oxigênio nas seguintes condições: pressão inicial do oxigênio de 20 a 40atm, temperatura final de 20 a 35° C, produtos na forma de cinzas, umidade presente no combustível e água resultante da combustão condensadas (água líquida),  $SO_2$ ,  $CO_2$  e  $N_2$  gasosos. O valor do PC é dito superior porque se recupera o calor de condensação da água. Com a bomba calorimétrica obtém-se o PC superior em volume constante. Na prática, entretanto, as combustões em queimadores e caldeiras se dão, em geral, sob pressão atmosférica e seus produtos escapam em temperatura tal que a água está em estado de vapor. Por isso, é necessário calcular, a partir do  $PCS_{V_{cte}}$  obtido pela bomba, o PC inferior a pressão constante.

### 2.8.2 Aparelhagem

#### a) Bomba calorimétrica

Recipiente de aço inoxidável, de paredes resistentes e tampa rosqueável. Na tampa existem válvulas para entrada de  $O_2$  e para saída dos gases após a combustão. Na tampa, também há eletrodos para o circuito elétrico como descrito em seguida. Dentro da bomba, fica suspenso um pequeno recipiente inatacável (feito com aço inox, quartzo, platina, etc.), que contém a amostra de combustíveis.

#### b) Recipiente calorimétrico

Recipiente metálico, cromado ou de aço inoxidável, dentro do qual se coloca sempre a mesma quantidade de água na qual se imerge a bomba, um agitador e um termômetro. Esse recipiente é uma das partes mais importantes do calorímetro, pois é na água que ele contém que se medirá o aumento de temperatura provocado pelo calor transferido da bomba calorimétrica, onde ocorreu a queima do combustível.

#### c) Recipiente externo

Recipiente de dupla parede entre as quais há ar ou um isolante térmico sólido. Nele é colocado o recipiente calorimétrico sobre suportes isolantes. Possui tampa com orifícios que permitem a passagem de termômetro, agitador e fios elétricos.

#### d) Sistema elétrico



É utilizado para iniciar queima do combustível da seguinte maneira: um fio fino de ferro é aquecido pela passagem de uma corrente elétrica. O fio entra em combustão e inicia a queima da amostra de combustível.

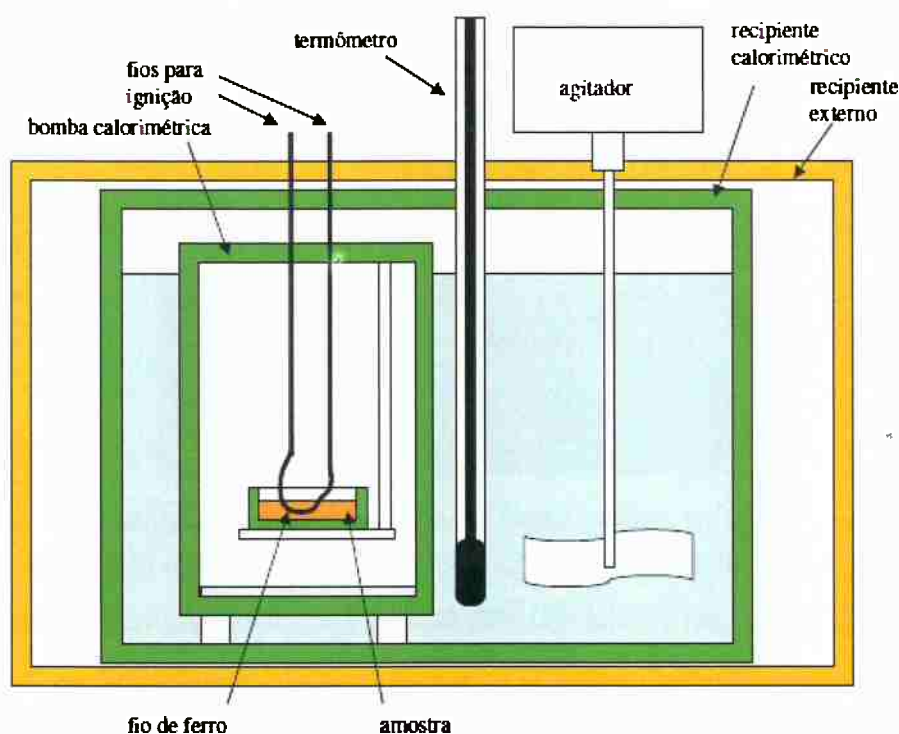
e) Termômetro

Existem dois tipos de termômetros que podem ser utilizados:

- termômetro com graduação entre 20 e 35° C e divisões até 0,02°C (utilizado no procedimento experimental);
- termômetro de Beckmann, que possui bulbo grande, capilar muito fino, com depósito suplementar de mercúrio na parte superior, escala de 5°C e divisões até 0,01°C.

Permite apenas a leitura de diferenças de temperatura.

Figura 5 - Esquema de um calorímetro



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Preparação inicial

Para realização da parte experimental deste presente trabalho, comprou-se 5 cocos verdes da espécie *Cocos nucifera* de tamanhos variados. O produto foi adquirido na região de São Bernardo do Campo, em uma banca de produtos naturais, mas não se sabe a origem deste.

Figura 6 - Exemplo de coco para a parte experimental.



Lavou-se cada um dos cocos em água corrente e retirou-se a água de cada um deles. Visando o aproveitamento do coco por completo, nenhuma das suas quatro partes, epicarpo, mesocarpo, endocarpo e albúmen, foi descartada.

Antes do início da pesagem de cada uma das partes do coco citadas anteriormente, embrulhou-se cada um deles em papel filme e, posteriormente, partiu cada um deles ao meio de forma manual. A iniciativa de embrulhar foi para evitar qualquer tipo de perda de massa.

Tabela 6 - Massa inicial cocos e as respectivas porcentagens.

Massa inicial - 15/05/2018					
	Coco inteiro (g)	Água	Albúmen	Endocarpo	Epicarpo e mesocapo
Coco 1	1319,73	27%	3%	8%	61%
Coco 2	1705,03	22%	7%	9%	61%
Coco 3	1513,74	23%	5%	9%	61%
Coco 4	1287,14	25%	5%	10%	58%
Coco 5	1394,61	27%	4%	10%	57%

Para realizar as pesagens acima, utilizou-se uma balança eletrônica.

### 3.2 Secagem

As respectivas partes de cada coco, epicarpo, mesocarpo, endocarpo e albúmen foram embaladas em papel alumínio, identificadas e levadas para secagem em estufa a 110°C, cuja marca é Biomatic. Periodicamente, pesavam-se todas as amostras para acompanhar a perda de massa até que todas as amostras apresentassem massa estável.

Figura 7 - Estufa de secagem.



Assim foi possível construir as tabelas abaixo nos momentos das pesagens periódicas:

Tabela 7 - Pesagem periódica 1.

Pesagem 18/05/2018			
	Albúmen (g)	Endocarpo (g)	Epicarpo e Mesocarpo (g)
Coco 1	18,40	39,41	594,83
Coco 2	39,42	119,36	520,85
Coco 3	43,50	97,25	246,46
Coco 4	42,34	53,52	493,11
Coco 5	24,76	95,61	692,11

Tabela 8 - Pesagem periódica 2.

Pesagem 21/05/2018			
	Albúmen (g)	Endocarpo (g)	Epicarpo e Mesocarpo (g)
Coco 1	2,87	18,90	120,15
Coco 2	19,79	77,08	214,52
Coco 3	19,33	58,13	122,08
Coco 4	19,40	28,38	164,82
Coco 5	13,91	66,47	381,53

Tabela 9 - Pesagem periódica 3.

Pesagem 22/05/2018			
	Albúmen (g)	Endocarpo (g)	Epicarpo e Mesocarpo (g)
Coco 1	2,65	17,80	98,31
Coco 2	19,74	69,34	142,73
Coco 3	8,16	35,48	115,39
Coco 4	5,08	27,16	102,02
Coco 5	2,69	20,98	127,83

Tabela 10 - Pesagem periódica 4.

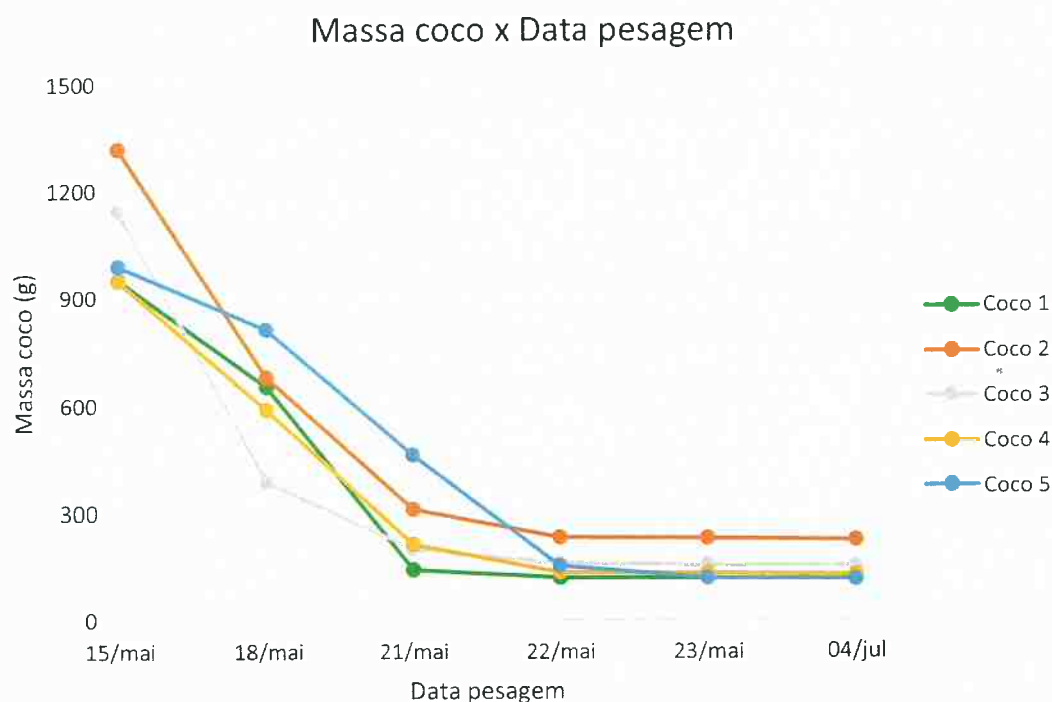
Pesagem 23/05/2018			
	Albúmen (g)	Endocarpo (g)	Epicarpo e Mesocarpo (g)
Coco 1	2,64	17,65	97,37
Coco 2	19,66	69,16	139,56
Coco 3	7,92	35,20	111,24
Coco 4	4,94	27,09	98,68
Coco 5	2,60	20,83	94,59

Tabela 11 - Pesagem periódica 5.

Pesagem 04/07/2018			
	Albúmen (g)	Endocarpo (g)	Epicarpo e Mesocarpo (g)
Coco 1	2,46	17,31	94,77
Coco 2	19,57	68,90	134,23
Coco 3	7,65	35,16	108,81
Coco 4	4,82	26,92	94,43
Coco 5	2,40	20,51	90,90

Com os dados contidos nas tabelas acima foi possível construir o gráfico ilustrativo da cronologia de perda de massa.

Gráfico 4 - Cronologia da perda de massa.



Após a quinta pesagem as massas das amostras já estavam estáveis e as mesmas apresentavam visíveis mudanças físicas, devido a secagem, como pode ser visto na figura abaixo:

Figura 8 - Amostras de coco secas.



### 3.3 Moagem

A etapa de moagem foi realizada com todas as quatro partes do coco, visando obter amostras homogêneas, tanto em composição quanto em granulometria. Dessa forma, a granulometria proposta foi selecionada usando uma peneira com malha de 60mesh, porque é uma exigência técnica para alguns dos testes futuros, como difração de raio-x e medição do PCS.

Para isso, primeiro, utilizou-se um moinho de facas, tipo Miley, Model 4. Posteriormente, peneirou-se o produto dessa primeira moagem em uma peneira com malha compatível à granulometria proposta. Dessa forma, cerca de 60% em massa do total da amostra já alcançou a granulometria desejada.

Figura 9 - Moinho de facas, tipo Miley, Model 4



Figura 10 - Peneira 60 mesh passante.



A amostra que ficou retida na peneira, posteriormente, foi triturada no moinho de bolas, vide figura abaixo. De forma sucessiva, até se alcançar 90% ou mais de significância, moeu-se e peneirou-se a amostra. Como resultado se obteve 95% de significância da amostragem.

Figura 11 - Moinho de bolas.



Ao final da etapa de moagem, obtiveram-se 680g de coco verde moído com granulometria compatível a peneira de malha de 60mesh.

Figura 12 - Amostra final após moagem.



### 3.4 Carbonização

Com toda a amostra obtida na etapa anterior de moagem se sucedeu a carbonização. Nessa etapa a carbonização foi feita em quatro temperaturas diferentes, sendo, respectivamente, 200, 300, 500 e 700°C, isso para se avaliar no final a relação da temperatura de carbonização com o produto obtido e sua disponibilidade energética.

Lembrando-se do objetivo do trabalho, que é a produção de carvão vegetal a partir do coco verde e estudo da viabilidade energética, escolheu-se a carbonização lenta justamente porque prioriza o carvão como principal produto do processo. Para isso, alguns parâmetros do processo foram definidos com o auxílio das literaturas contidas na bibliografia, como pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 12 - Parâmetros definidos para carbonização

Carbonização	
Taxa de aquecimento (°C/min)	6,00
Tempo de permanência forno (min)	60

Diferentemente do que foi sugerido pela literatura, em que usava 30 minutos como tempo de permanência, utilizou-se 60 minutos para adequar a possíveis erros de medição do termopar acoplado ao forno. A taxa de aquecimento escolhida foi simplesmente pela média aritmética da sugerida pela literatura, que era o intervalo de 5 a 7°C/min.



Para toda essa importante etapa da carbonização, sem dúvida, uma das ferramentas mais primordiais do processo foi a fabricação da uma retorta, conforme pode ser observado na figura abaixo:

*Figura 13 - Retorta utilizada na carbonização*



A fabricação dessa retorta possibilitou que as massas de coco verde moídas a serem carbonizadas fossem muito maiores do que o método utilizado anteriormente, em que se utilizavam pequenos cadinhos de porcelana.

Objetivando-se obter resultados fiéis aos encontrados na literatura, um dia antes da realização da carbonização em cada uma das temperaturas citadas, a amostra de coco verde moída foi deixada na estufa, cuja marca é Icamó mod.2, para que a absorção de umidade não interferisse no processo.

Figura 14 - Estufa pré carbonização



Utilizando balança eletrônica, pesou-se as amostras de coco verde na retorta e iniciou-se o processo de carbonização. Para isso, utilizou-se o forno vertical, cuja marca é Lindberg-Blue, acoplado a uma capela para escoar os produtos voláteis da carbonização, e a um kitasato cheio de água para condensar os demais produtos voláteis.

Figura 15 - Central eletrônica de ajuste dos parâmetros da carbonização



Figura 16 - Forno Lindberg-Blue usado na carbonização



Figura 17 - Capela acoplada ao forno vertical



Assim, foi possível produzir as seguintes amostras abaixo:

Figura 18 - Amostra de coco carbonizadas nas temperaturas: A) 200°C; B) 300°C; C) 500°C; D) 700°C



### 3.5 Composição imediata

A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas. Determina-se a partir de uma adaptação as normas ASTM Standard Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke, D 3172-73 a D 3175-73 (ASTM, 1983), exceto a D 3173-73 pois a umidade foi determinada por um outro método.

### 3.5.1 Teor de umidade

Após a etapa de carbonização obtiveram-se 5 amostras de coco verde, respectivamente, coco verde seco, coco verde carbonizados a 200, 300, 500 e 700°C. Antes da medição da umidade das amostras deixou-se cada uma delas por 24h na estufa já ilustrada na figura 14. Essa parte experimental foi realizada no Departamento de Engenharia Química, no LAREX, localizado no prédio semi-industrial.

Para medição da umidade de cada uma das amostras foi utilizado o equipamento IV 2000 – analisador de umidade por infravermelho, da marca Gehaka. Nele os resultados são obtidos após operações simples e rápidas, apresentando a leitura do percentual de umidade. Foi projetado para medir o percentual de umidade ou sólidos totais de produtos granulados, em pó, líquidos e híbridos de substâncias orgânicas, minerais e químicas.

Para a realização dessa etapa pesava-se sempre mais de 1g de cada amostra com o auxílio de uma balança analítica, cuja marca é Ohaus – modelo Adventurer, e levava-se cada amostra até o equipamento, onde em poucos minutos eram obtidos o teor de umidade. Fez-se esse teste em duplicata para cada uma das amostras.

*Figura 19 - Balança utilizada na medição do teor de umidade*



Figura 20 - Equipamento IV2000



Tabela 13 - Dados análises de umidade

Seca		
Amostra	Massa inicial (g)	Umidade
1	1,5041	4,4%
2	1,5053	3,5%
Carbonizada 200°C		
Amostra	Massa inicial (g)	Umidade
1	1,4983	4,0%
2	1,5076	3,7%
Carbonizada 300°C		
Amostra	Massa inicial (g)	Umidade
1	1,4035	4,2%
2	1,4031	4,4%
Carbonizada 500°C		
Amostra	Massa inicial (g)	Umidade
1	1,4246	5,6%
2	1,4211	5,1%
Carbonizada 700°C		
Amostra	Massa inicial (g)	Umidade
1	1,5078	3,9%
2	1,5065	3,4%

### 3.5.2 Teor de voláteis

Com outras 5 amostras de coco verde, nas mesmas condições já apresentadas, sucedeu-se a análise de voláteis. Para isso, adaptou-se o procedimento apresentado na norma ASTM D 3175-73.

Com todas as amostras foram feitos os ensaios em triplicata para conseguir valores mais confiáveis. Antes de início de uma das análises todas as amostras já estavam durante 24h na estufa a 110°C.

Com o auxílio de uma balança analítica, cuja marca é Shimadzu – modelo AUY220, mediu-se cerca de 1g de cada amostra. Colocava-se a massa pesada em um cadinho, como o mostrado na figura 21, e depois no mesmo forno vertical já ilustrado na figura 16.

Posteriormente, já no forno, a amostra passava por dois ciclos de 20 minutos cada. No primeiro, com o forno já a 950°C, expunha-se a amostra a um ambiente de gás nitrogênio, com  $p(N_2) = 0,05\text{MPa}$  e  $Q(N_2) = 0,08\text{m}^3/\text{h}$ . No segundo ciclo, com temperatura e  $p(N_2)$  constantes, variava-se a vazão para  $Q(N_2) = 0,4\text{m}^3/\text{h}$ .

Ao final, retirava-se a amostra do forno e pesava-se a massa final na mesma balança já citada acima.

*Figura 21 - Balança utilizada*



Figura 22 - Cadinho utilizado na análise de voláteis



Tabela 14 - Parâmetros análises de voláteis

Análise de voláteis		
pN <sub>2</sub> (MPa)		0,05
1	Q(N <sub>2</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)	0,08
	T (°C)	950
	t (min)	20
2	Q(N <sub>2</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)	0,4
	T (°C)	950
	t (min)	20



Tabela 15 - Dados análises voláteis

Seca				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)
1	35,8978	1,0125	36,1824	0,7279
2	30,1351	1,0000	30,4139	0,7212
3	35,8946	1,0002	36,1679	0,7269
Carbonizada 200°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)
1	30,1341	1,0000	30,4432	0,6909
2	35,8929	1,0001	36,1766	0,7164
3	30,1341	1,0002	30,4133	0,7210
Carbonizada 300°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)
1	35,8869	1,0002	36,4505	0,4366
2	30,1073	1,0001	30,6812	0,4262
3	35,8868	1,0003	36,5098	0,3773
Carbonizada 500°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)
1	30,1075	1,0002	30,909	0,1987
2	35,8845	1,0003	36,6578	0,2270
3	30,1085	1,0003	30,9074	0,2014
Carbonizada 700°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)
1	35,8836	1,0005	36,7838	0,1003
2	30,1072	1,0002	30,9873	0,1201
3	35,8815	1,0004	36,7418	0,1401

### 3.5.3 Teor de cinzas

Por último, com mais 5 amostras de coco verde nas condições já citadas, realizou-se a análise de cinzas. Para isso, adaptou-se o procedimento apresentado na norma ASTM D 3174-73.

Com cada uma das condições do coco verde o ensaio foi realizado em triplicata para se obter resultados mais confiáveis. Posteriormente ao início as amostras já estavam na estufa, a 110°C, por 24h.

Com o auxílio da balança analítica já ilustrada na figura 21 pesava-se cerca de 1g de amostra. Depois, levavam-se os 3 cadinhos para o forno do tipo mufla, cuja marca é Quimis. Com os cadinhos dentro do forno o mesmo era ligado, depois de estabelecer a temperatura final para 950°C. Durante 24h os cadinhos eram deixados

no forno nessa temperatura pré-definida e ao final media-se a massa que restou depois do processo.

*Figura 23 - Cadinhos utilizados na análise de cinzas*



*Figura 24 - Forno tipo mufla*



Tabela 16 - Parâmetro análise de cinzas

Análise de cinzas	
T(°C)	950
t (h)	24

Tabela 17 - Dados análises de cinzas

Seca				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa cinzas (g)
1	28,5018	1,0005	28,5331	0,0313
2	32,1852	1,0002	32,202	0,0168
3	27,9424	1,0004	27,9791	0,0367
Carbonizada 200°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa cinzas (g)
1	28,977	1,0004	28,9996	0,0226
2	30,643	1,0000	30,671	0,0280
3	30,2256	1,0006	30,2496	0,0240
Carbonizada 300°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa cinzas (g)
1	28,4986	1,0001	28,5454	0,0468
2	32,1676	1,0002	32,2172	0,0496
3	27,9447	1,0004	27,9874	0,0427
Carbonizada 500°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa cinzas (g)
1	28,9607	1,0001	29,0304	0,0697
2	30,6346	1,0000	30,707	0,0724
3	30,2037	1,0004	30,272	0,0683
Carbonizada 700°C				
Cadinho	Massa cadinho (g)	Amostra (1g)	Massa final (g)	Massa cinzas (g)
1	28,4972	1,0006	28,5792	0,0820
2	32,1688	1,0005	32,2504	0,0816
3	27,9397	1,0001	28,0216	0,0819

### 3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS

A microscopia eletrônica de varredura é um método de imagem de alta resolução que oferece informações sobre a morfologia e a identificação de elementos

químicos de uma amostra sólida. É considerado um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais.

Com as 5 amostras de coco verde analisadas, sendo, respectivamente, coco verde seco, carbonizados a 200, 300, 500 e 700°C, a preparação começou deixando-as 24h na estufa antes da análise.

Para tornar as amostras condutoras e obter imagens com boa resolução, foi utilizada uma máquina metalizadora de deposição de íons metálicos de ouro. O equipamento é da marca Balzers, modelo SCD 050.

*Figura 25 - Equipamento utilizado para metalização*



As análises de imagem de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. O MEV utilizado é da marca e modelo INSPECT F50.

Figura 26 - MEV utilizado



Os aumentos utilizados foram de 150 a 10000x.

O Equipamento EDS ou EDX, é um Espectrômetro de Raio-X que permite determinar com precisão a Composição Química de qualquer material sólido contendo elementos da Tabela Periódica entre o Boro (B) e o Urânio (U). Este tipo de Equipamento é especialmente indicado para a análise química de microestruturas, podendo identificar a composição química de Partículas a partir de 5 microns de tamanho.

### **3.7 Poder calorífico superior (PCS)**

Para realizar a parte experimental seguiu-se o procedimento abaixo, o qual foi retirado da norma ASTM mencionada no começo desse tópico.

Tal análise foi realizada o Departamento de Engenharia Química, no laboratório de combustão de combustíveis.

Procedimento:

a) Pesar de 0,8 a 1,0g, com precisão de 1mg, de cada uma das amostras de coco verde;

- b) Colocar o cadinho com o combustível suspenso dentro da bomba;
- c) Cortar 10 cm de fio de ferro;
- d) Passar o fio através da amostra, ligar uma de suas extremidades à haste que suporta o recipiente com a amostra e a outra extremidade à outra haste que desce da tampa da bomba;
- e) Colocar-se 1mL de água na bomba e fechá-la. Essa água serve para absorver os gases ácidos liberados na queima do combustível;
- f) Pressurizar a bomba: fechar a saída de gases da bomba calorimétrica e ligar a válvula de admissão ao cilindro do oxigênio sob pressão. Elevar a pressão do O<sub>2</sub> na bomba em torno de 30atm, fechar o cilindro e desligá-lo da bomba;
- g) Colocar uma massa conhecida de água no recipiente calorimétrico;
- h) Colocar a bomba no recipiente calorimétrico e este no recipiente exterior;
- i) Fazer as ligações elétricas;
- j) Cobrir com a tampa, ligar o agitador e mergulhar o termômetro;
- k) Esperar 5 minutos para que desapareçam as perturbações térmicas;
- l) Ler a temperatura (com precisão de 0,01°C de minuto em minuto durante 5 minutos;
- m) Fazer a ignição;
- n) Ler a temperatura aos 45, 60, 75, 90, 105 e 120 segundos após a ignição;
- o) Continuar lendo a temperatura de minuto em minuto, até esta se tornar constante ou variar apenas levemente, de modo linear. Fazer mais cinco leituras nesta região linear.

Para realização do experimento acima utilizou-se a bomba calorimétrica da marca Parr. Durante o experimento foram utilizadas quatro bombas calorimétricas contidas no laboratório e, para realizar os cálculos que serão apresentados posteriormente, colheu-se alguns dados que serão expostos nas tabelas abaixo:

Tabela 18 - Dados bombas calorimétricas

Bomba calorimétrica	Capacidade Calorífica (cal/°C)
A	2168,04
B	2424,05
C	2460,66
D	2391,51

Tabela 19 - Dados medições PCS

Condição	Massa (g)	Ti (°C)	Tf (°C)	$\Delta T$ (°C)
Seca	0,9343	23,6	25,4	1,8
Carbonizada 200°C	0,9376	23,9	25,7	1,8
Carbonizada 300°C	0,9734	23,8	26	2,2
Carbonizada 500°C	0,9374	23,8	26,3	2,5
Carbonizada 700°C	0,9902	23,9	26,5	2,6

Tabela 20 - Dados fio de ferro

Poder Calorífico Fe (cal/g)	Massa Fe (g)
1400	0,007

Figura 27 - Bomba calorimétrica

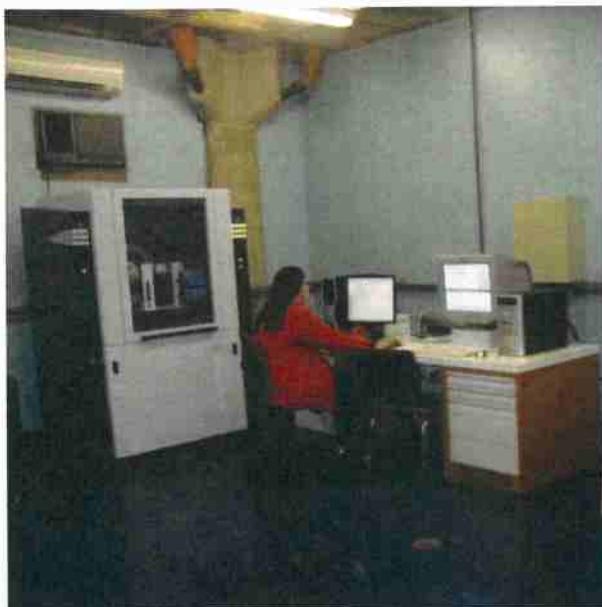


### 3.8 Difração de raio-x (DRX)

A DRX é uma técnica não destrutiva, amplamente estabelecida para medir com boa reprodutibilidade os parâmetros estruturais dos materiais carbonosos.

Essa parte experimental foi realizada no Instituto de Geociência da USP no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX). Para realização dessa parte foi utilizado um difratômetro de pó Siemens, modelo D5000 com detector de cintilação e ótica fixa.

*Figura 28 - Difratômetro utilizado*





## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Secagem

Com o acompanhamento e pesagem periódicos das amostras de coco verde foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 21 - Massa de coco verde ao longo do tempo

	15/mai	18/mai	21/mai	22/mai	23/mai	04/jul
Massa coco 1 (g)	949,58	652,64	141,92	118,76	117,66	114,54
Massa coco 2 (g)	1316,97	679,63	311,39	231,81	228,38	222,70
Massa coco 3 (g)	1140,78	387,21	199,54	159,03	154,36	151,62
Massa coco 4 (g)	947,50	588,97	212,60	134,26	130,71	126,17
Massa coco 5 (g)	988,61	812,48	461,91	151,50	118,02	113,81

A umidade média do coco verde, que pode chegar aos 85% (base úmida). (ANDRADE e colab., 2004)

Com os dados contidos na tabela 22 foi possível constatar que os valores conseguidos estão de acordo com a literatura utilizada, como pode ser visto abaixo:

Tabela 22 - Porcentagem de umidade

	Porcentagem umidade
Massa coco 1	87,94%
Massa coco 2	83,09%
Massa coco 3	86,71%
Massa coco 4	86,68%
Massa coco 5	88,49%

### 4.2 Moagem

Seguido do processo de secagem a moagem foi feita até se obter mais de 90% de representatividade da amostra. No final, obteve-se cerca de 95% de significância da amostra para a etapa seguinte que seria a carbonização.

### 4.3 Carbonização

Preocupou-se em medir o rendimento para cada temperatura de carbonização, e assim foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 23 - Rendimento gravimétrico carbonização

	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa voláteis (g)	Rendimento
200°C	34,77	33,46	1,31	96,23%
300°C	38,15	21,04	17,11	55,15%
500°C	39,25	14,69	24,56	37,43%
700°C	37,90	12,97	24,93	34,22%
	39,90	12,97	26,93	32,51%

Nota-se a diminuição do rendimento com o aumento da temperatura de carbonização devido à perda de massa pela formação de compostos voláteis como CO, CO<sub>2</sub>, ácido acético e alguns outros compostos voláteis orgânicos. Assim, do ponto de vista de rendimento gravimétrico, menores temperaturas apresentam melhores rendimentos.

#### 4.4 Composição imediata

##### 4.4.1 Teor de voláteis

Obtidos os cinco tipos de amostras de coco verde, a etapa seguinte foi a de análise da composição imediata, segundo as normas ASTM citadas na descrição dos métodos.

Com os dados obtidos na análise de voláteis foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 24 - Análise de voláteis

Condição	Média massa (g)	Média massa voláteis (g)	Teor médio de voláteis
Seca	1,0042	0,7253	72,2%
Carbonizada 200°C	1,0001	0,7094	70,9%
Carbonizada 300°C	1,0002	0,4134	41,3%
Carbonizada 500°C	1,0003	0,2090	20,9%
Carbonizada 700°C	1,0004	0,1202	12,0%

Nos resultados obtidos com a análise de voláteis é possível observar que as amostras de menores temperaturas apresentaram um maior teor médio de voláteis, justamente porque tais compostos não foram vaporizados durante o processo de carbonização, assim como ocorreu com as amostras carbonizadas em maiores temperaturas.

#### 4.4.2 Teor de umidade

Com os dados obtidos na análise de umidade foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 25 - Análise de umidade

Condição	Média massa (g)	Média porcentagem de umidade
Seca	1,5047	4,0%
Carbonizada 200°C	1,5030	3,9%
Carbonizada 300°C	1,4033	4,3%
Carbonizada 500°C	1,4229	5,4%
Carbonizada 700°C	1,5072	3,7%

Notam que os resultados obtidos são bastantes semelhantes para todas as amostras, não sendo possível apontar alguma tendência que se relaciona com a condição de cada amostra.

#### 4.4.3 Teor de cinzas

Com os dados obtidos na análise de cinzas foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 26 - Análise de cinzas

Condição	Média massa (g)	Média massa cinzas (g)	Teor médio de cinzas
Seca	1,0004	0,0283	2,8%
Carbonizada 200°C	1,0003	0,0249	2,5%
Carbonizada 300°C	1,0002	0,0464	4,6%
Carbonizada 500°C	1,0002	0,0701	7,0%
Carbonizada 700°C	1,0004	0,0818	8,2%

Observa-se que o teor de cinzas aumentou com o aumento da temperatura de carbonização. Este comportamento pode ser explicado pela remoção de materiais voláteis ocasionados pela carbonização (pirólise), aumentando a fração proporcional de elementos minerais (não volatilizados) na distribuição dos constituintes nos carvões. (PADILLA e colab., 2018)

O teor de cinzas está relacionado com a presença de quantidades e de qualidades diferentes de minerais presentes na biomassa, assim minerais como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio, entre outros fazem aumentar o teor

de cinzas. (TEIXEIRA DO VALE, AILTON; GENTIL, LUIZ VICENTE; GONÇALEZ, JOAQUIM CARLOS; FLORIAN DA COSTA, 2007)

Assim, os resultados apresentados são bastante coerentes com os encontrados em literatura.

Obtendo-se os resultados das análises de voláteis e de cinzas é possível calcular o teor de carbono fixo para cada uma das amostras. Calcula-se a partir da equação (3) apresentada abaixo:

$$CF = 100 - (CN + V) \quad (3)$$

Onde, CF= carbono fixo; CN = cinzas; e V= voláteis

**Fonte:** (PADILLA e colab., 2018)

O rendimento em carbono fixo é o principal parâmetro a ser considerado por acaso da análise termogravimétrica de material lignocelulósico. O rendimento em carbono fixo envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal. (ANDRADE e colab., 2004)

Com os dados obtidos anteriormente foi possível construir a tabela resumo abaixo:

*Tabela 27 - Resumo das análises imediatas e cálculo do carbono fixo*

Condição	Análise imediata			
	Teor de umidade	Teor de voláteis	Teor de cinzas	Teor de carbono fixo
Seca	4,0%	72,23%	2,8%	24,9%
Carbonizada 200°C	3,9%	70,94%	2,5%	26,6%
Carbonizada 300°C	4,3%	41,33%	4,6%	54,0%
Carbonizada 500°C	5,4%	20,90%	7,0%	72,1%
Carbonizada 700°C	3,7%	12,01%	8,2%	79,8%

Nota-se o aumento significativo no teor de carbono fixo, com o aumento da temperatura. Estas alterações são explicadas pela volatilização e degradação de constituintes do coco verde devido ao aumento da temperatura de pirólise resultando em perda de massa. (PADILLA e colab., 2018)

Portanto, os resultados obtidos estão coerentes com os encontrados em literatura. E, pensando apenas na porcentagem de carbono fixo, maiores temperaturas são mais favoráveis ao processo.

#### 4.5 Poder Calorífico Superior (PCS)

Tendo em posse o teor de carbono fixo foi possível prosseguir para o teste mais importante deste presente trabalho. A medição dos PCS foi feita de quatro formas possíveis e teve seus valores comparados. A primeira delas foi realizada com o uso de bombas calorimétricas e as outras três com o uso de equações empíricas encontradas em literatura.

Laboratorialmente, mediu-se alguns parâmetros e, com o uso da equação (4) foi possível calcular o PCS para as cinco amostras.

$$PCS_v = \frac{CC \Delta T - e}{m} \quad (4)$$

Onde: CC= capacidade calorífica da bomba calorimétrica;  $\Delta T$ = diferença de temperatura; e= calor de combustão do fio de ferro; e m= massa da amostra.

Com os dados já fornecidos na tabela 20 foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 28 - PCS experimental

Condição	PCS (kcal/kg)
Seca	4166,40
Carbonizada 200°C	4713,51
Carbonizada 300°C	5395,03
Carbonizada 500°C	5771,60
Carbonizada 700°C	6355,01

A seguir, com as equações (5) e (6) foi possível calcular o PCS a partir da porcentagem de carbono fixo e, com a equação (7), foi possível calcular o PCS com a porcentagem de voláteis.

$$PCS = 94,19 \times \%CF + 55,01 \quad (5)$$

$$PCS = 4934,43 + 33,27 \times \%CF \quad (6)$$

$$PCS = 8239,47 - 32,95 \times \%V \quad (7)$$

Onde: CF = carbono fixo, V = voláteis e PCS = Poder calorífico superior.

Fonte: (VALE, AILTON TEIXEIRA DO; ABREU, VERA LÚCIA SILVA; GONÇALEZ, JOAQUIM CARLOS; DA COSTA, 2002)

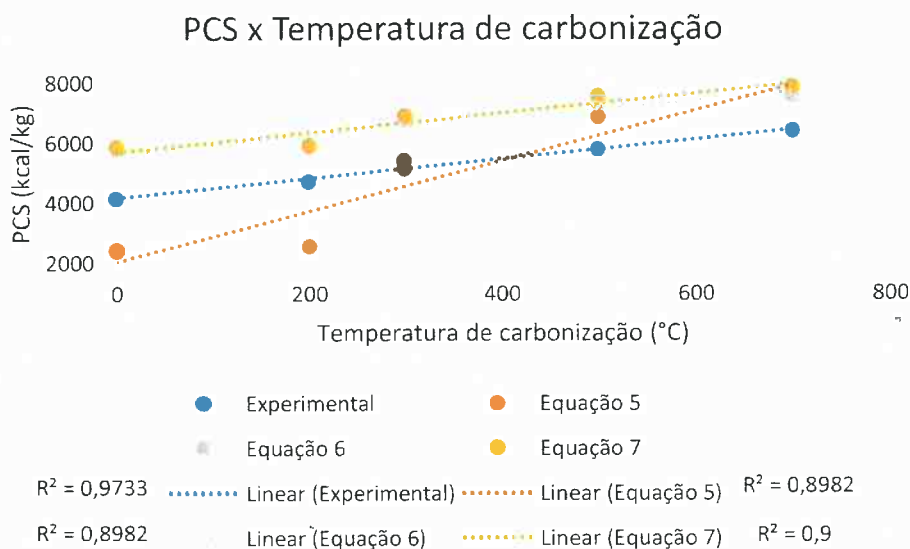
Assim, usando as equações acima que foram deduzidas para uma biomassa diferente (*Eucalyptus grandis*), foi possível obter os resultados mostrados na tabela abaixo:

Tabela 29 - Cálculos de PCS comparativos

Condição	PCS (kcal/kg)		
	Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7
Seca	2404,75	5764,41	5859,57
Carbonizada 200°C	2558,38	5818,68	5902,12
Carbonizada 300°C	5144,66	6732,21	6877,70
Carbonizada 500°C	6845,17	7332,87	7550,89
Carbonizada 700°C	7572,10	7589,63	7843,67

Assim, com o cálculo do PCS pelos quatro métodos citados foi possível construir o gráfico que ilustra melhor essa situação:

Gráfico 5 - PCS em função da temperatura de carbonização



Nota-se que, independentemente do método utilizado para calcular o PCS, há uma tendência de o poder calorífico aumentar com o aumento da temperatura de carbonização, isso porque tem uma relação direta com o aumento do teor de carbono fixo, visto que os materiais minerais não participam do processo de combustão. Ou seja, tanto o PCS quanto o teor de carbono fixo têm uma relação direta com a temperatura de carbonização.

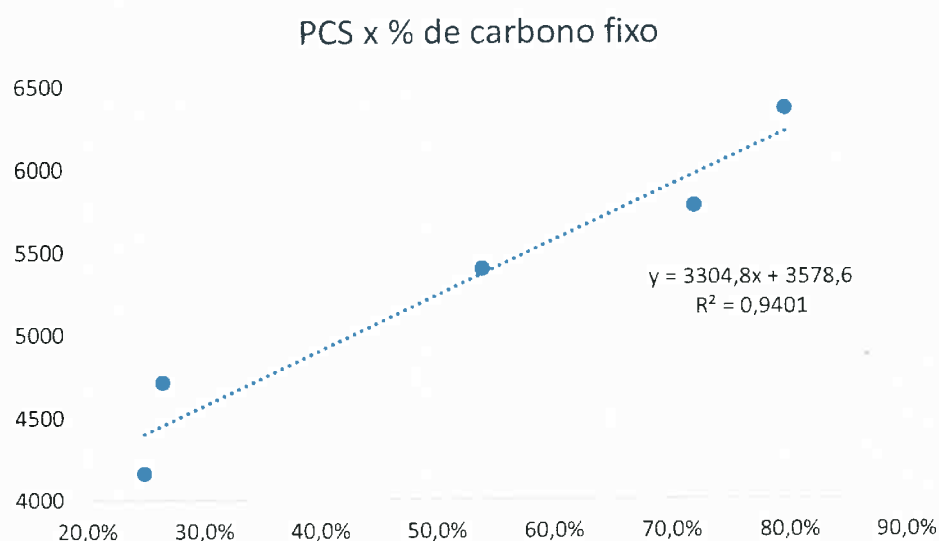
No gráfico os pontos com temperatura de carbonização 0°C se referem à amostra de coco verde apenas seca, porque não passou por nenhum tipo de carbonização.

Além disso todos os métodos de cálculo obtiveram um excelente coeficiente de correlação, sendo o valor experimental o que mais se destaca. No entanto, pensando na praticidade para obtenção desses valores, a equação empírica que tem como entrada a porcentagem de voláteis é o método mais fácil de se usar, pois se trata de um dado obtido pela análise imediata de voláteis, que é bastante rápida.

No entanto, para seguir com os cálculos se optou pelo uso do método que foi observado a melhor tendência linear, ou seja, o método experimental.

Pensando no teor de carbono fixo e no PCS, os dois dependentes da temperatura, é possível analisar a relação direta dessas duas variáveis com o gráfico abaixo.

Gráfico 6 - Relação do PCS em função do teor de carbono fixo



Do gráfico acima nota-se uma boa relação linear dessas duas variáveis, dados pelo elevado coeficiente de correlação. Assim, da mesma forma que as equações (5), (6) e (7) foram deduzidas para o caso particular do *Eucalyptus grandis* é possível fazer o mesmo para a biomassa estudada nesse trabalho:

$$PCS = 3304,8x\%CF + 3578,6 \quad (8)$$

Onde: CF = carbono fixo e PCS = Poder calorífico superior.

Com os dados da tabela 24 e com a equação 9, que será enunciada abaixo, foi possível calcular o rendimento energético:

$$RE = RG \times \frac{PCS_{CP}}{PCS_{SECO}} \quad (9)$$

Onde: RE = rendimento energético; RG = rendimento gravimétrico; PCS<sub>CP</sub> = PCS carvão produzido; PCS<sub>SECO</sub> = PCS coco verde seco.

Fonte: (PADILLA e colab., 2018)

Além disso, também com os dados da tabela 24 e da equação (10), que será ilustrada abaixo, foi possível calcular o rendimento de carbono fixo:

$$RCF = RG \times CF_{CP} \quad (10)$$

Onde: RCF = rendimento carbono fixo; CF<sub>CP</sub> = carbono fixo carvão produzido.

Fonte: (PADILLA e colab., 2018)

Assim, com os dados da tabela 24 e com uso das equações (9) e (10), foi possível construir a tabela abaixo:

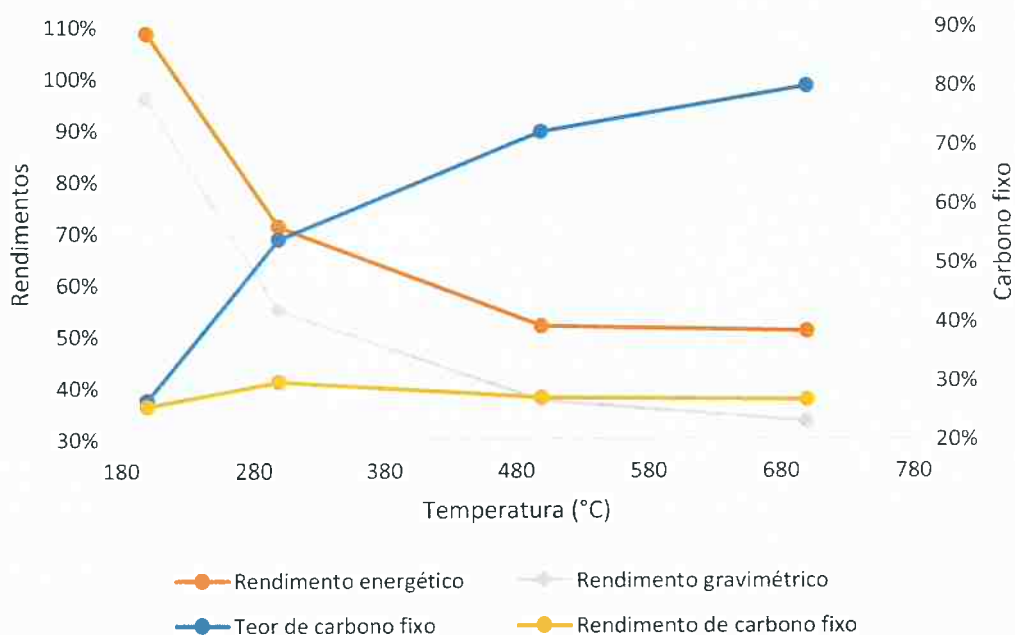
Tabela 30 - Rendimentos energético e de carbono fixo

Condição	Rendimento energético	Rendimento CF
Seca	-	-
Carbonizada 200°C	108,87%	25,58%
Carbonizada 300°C	71,41%	29,80%
Carbonizada 500°C	51,85%	26,98%
Carbonizada 700°C	50,89%	26,63%

Com os dados das tabelas 24 e 31 foi possível construir o gráfico abaixo que ilustra toda essa situação:



Gráfico 7 - Variáveis dependentes da temperatura



Comparando as tendências dos dados das tabelas 28 e 29, de modo geral, há um aumento de carbono fixo e PCS conforme a elevação da temperatura de pirólise. Porém, quanto maior a temperatura, menor será o rendimento gravimétrico, o que é inversamente proporcional ao carbono fixo. Ainda, de acordo com o gráfico 7, observa-se que a partir de 500°C o rendimento energético permanece constante, diminuindo em 700°C devido ao seu baixo rendimento gravimétrico. Esse comportamento mostra que, considerando o rendimento energético, a melhor condição para a produção do carvão poderia ocorrer em temperaturas abaixo de 500 °C.

O gráfico 7 mostra que a condição de pirólise mais adequada para a produção do carvão vegetal pirolítico (maior rendimento energético x teor de carbono fixo) encontra-se em torno 310 °C, onde as curvas laranja e azul se cruzam, ou seja, na intersecção entre o máximo de carbono fixo e o máximo de rendimento energético. A projeção de ponto indica que nessa condição “teórica” de pirólise é possível produzir o carvão vegetal de coco verde com um rendimento gravimétrico e energético de 52% e 70% respectivamente. Com esses dados e o PCS da amostra de coco verde seca pode ser calculado o PCS desse ponto teórico utilizando a equação 9:

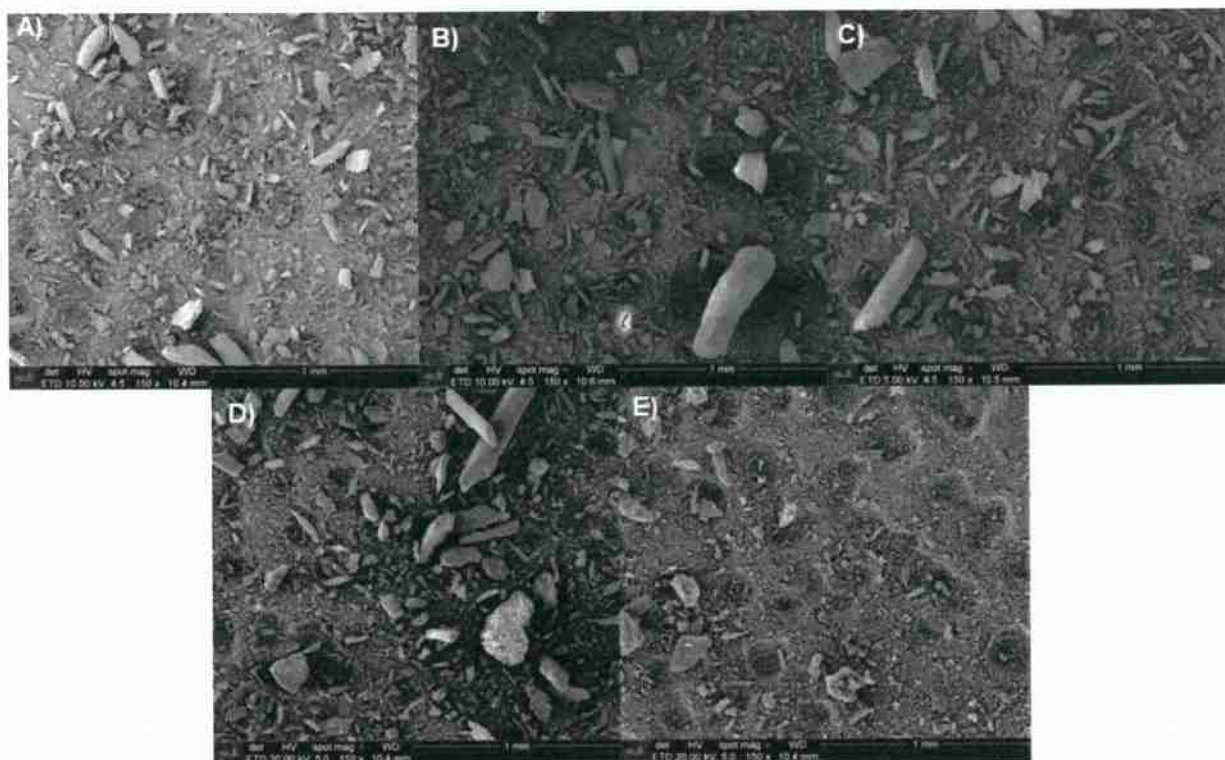
$$70\% = 52\% \times \frac{PCS_{CP(310^{\circ}C)}}{4166,40} \rightarrow PCS_{CP(310^{\circ}C)} = 5608,62 \text{ kcal/kg}$$

Além disso, projetando esse ponto ótimo encontrado é possível verificar, com a curva amarela, que se trata do ponto em torno do máximo de rendimento em carbono fixo, característica que tem relação direta com o poder calorífico e com a temperatura.

#### 4.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS

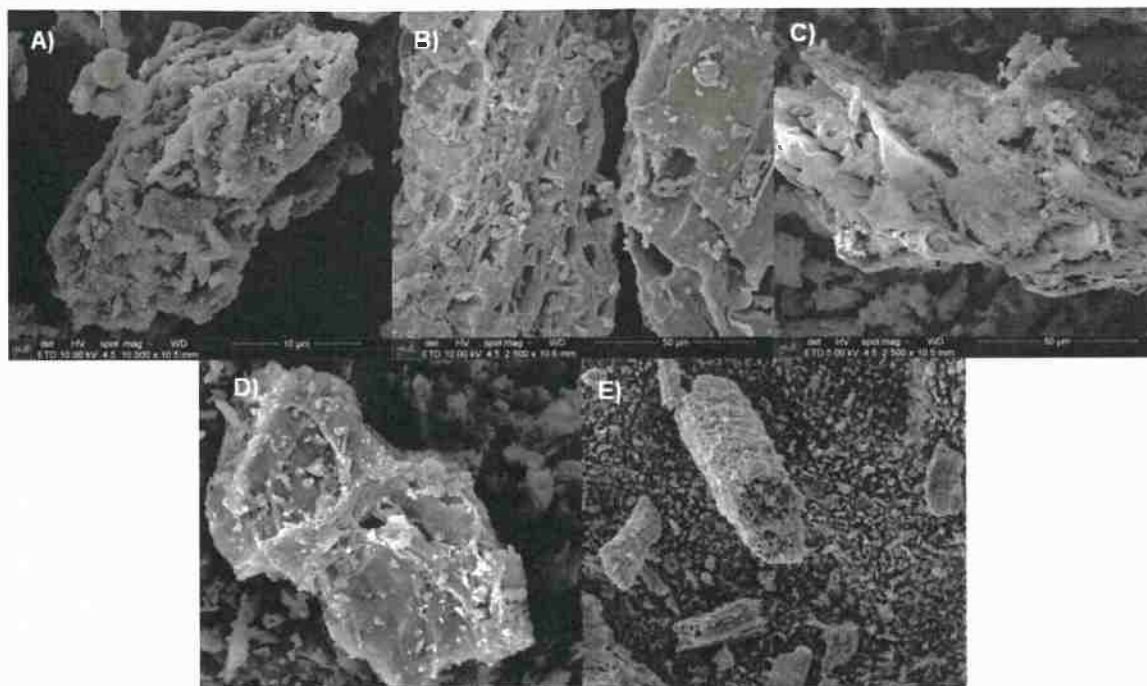
Com relação as imagens obtidas no MEV, com a figura abaixo é possível observar que ocorreu o refinamento da microestrutura com o aumento da temperatura, ou seja, o aumento da temperatura deixou a microestrutura mais fina.

Figura 29 - Visão geral, com aumento de 150x, de cinco amostras de coco verde, sendo: A) Seco; B) Carbonizado 200°C; C) Carbonizado 300°C; D) Carbonizado 500°C; E) Carbonizado 700°C.



Com relação a porosidade, a figura abaixo auxilia a entender o resultado obtido.

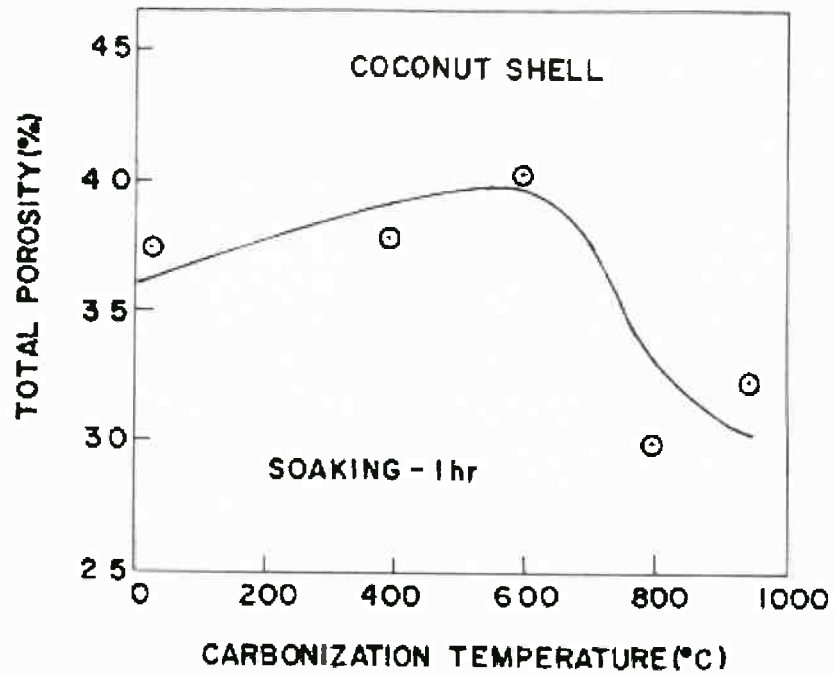
Figura 30 - Avaliação da porosidade nas amostras de coco verde. Sendo, respectivamente, coco verde seco, carbonizados a 200, 300, 500 e 700°C, para diferentes aumentos



Os resultados para a porosidade indicaram que um aumento na temperatura de carbonização até 600°C, em geral, produziu um aumento na porosidade dos carvões de casca resultantes, seguido por uma diminuição com o aumento da temperatura até o faixa estudada, ou seja, 950°C. O aumento na porosidade de até 600°C é atribuído à criação de novos poros e alargamento dos poros existentes através da evolução da matéria volátil. À medida que a temperatura é aumentada acima de 600°C, a contribuição da liberação volátil na criação de novos poros torna-se muito pequena e a deposição de carbono pirolítico (que ocorre como resultado do craqueamento de hidrocarbonetos) e o alinhamento microcristalino da matriz de carbono leva à retração do poro estrutura predominante. Todos esses fenômenos contrabalançam um ao outro de tal maneira que a porosidade total do carvão resultante diminui com o aumento da temperatura de carbonização acima de 600°C. (KUMAR e JENA, 2006)

Com o auxílio da figura 30 é possível notar o aumento da porosidade com o aumento da temperatura para as amostras de A) a C), no entanto, não é possível notar essa temperatura limiar em que, após ela, esse crescimento da porosidade não acontece no mesmo ritmo.

Gráfico 8 - Efeito da temperatura na porosidade da casca de coco

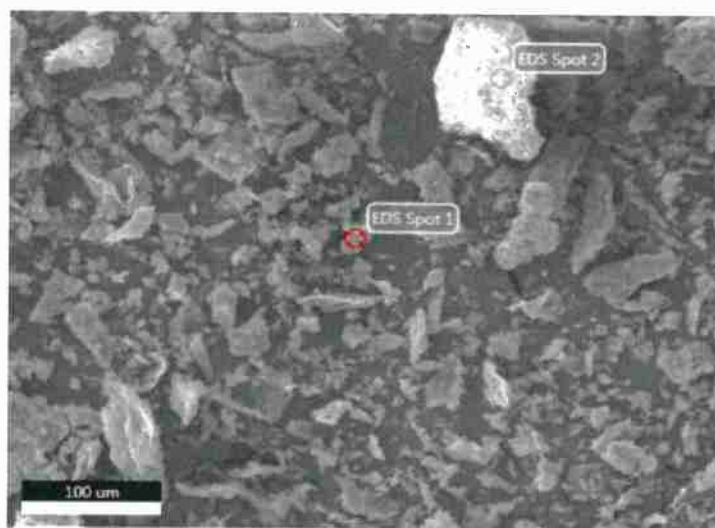


Fonte: (KUMAR e JENA, 2006)

Juntamente com o MEV foi realizado o EDS, para descobrir a composição química de cada uma das amostras de coco.

Para a amostra seca foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 31 - Área usada para EDS da amostra seca



Escolheu-se duas estruturas de morfologias distintas para análise química. Assim, obtiveram-se os resultados abaixo:

Figura 32 - Espectro de EDS ponto 1

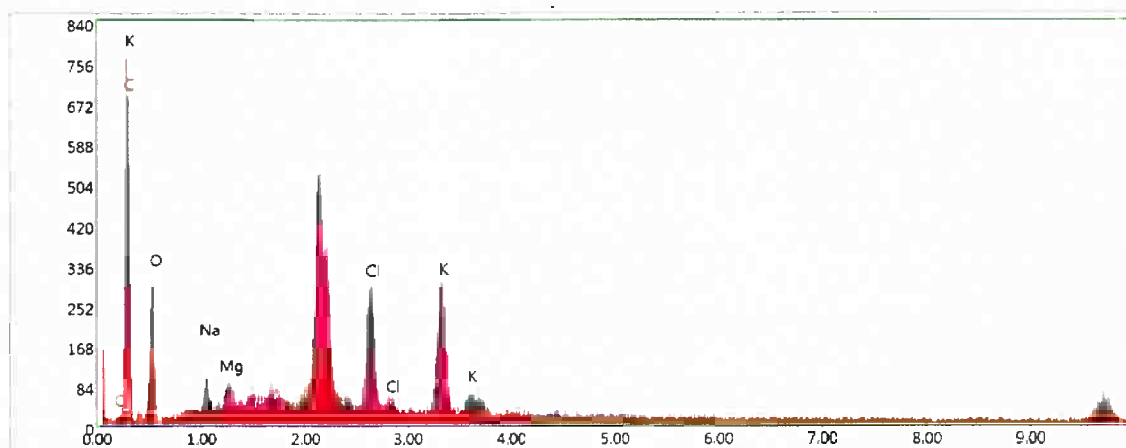
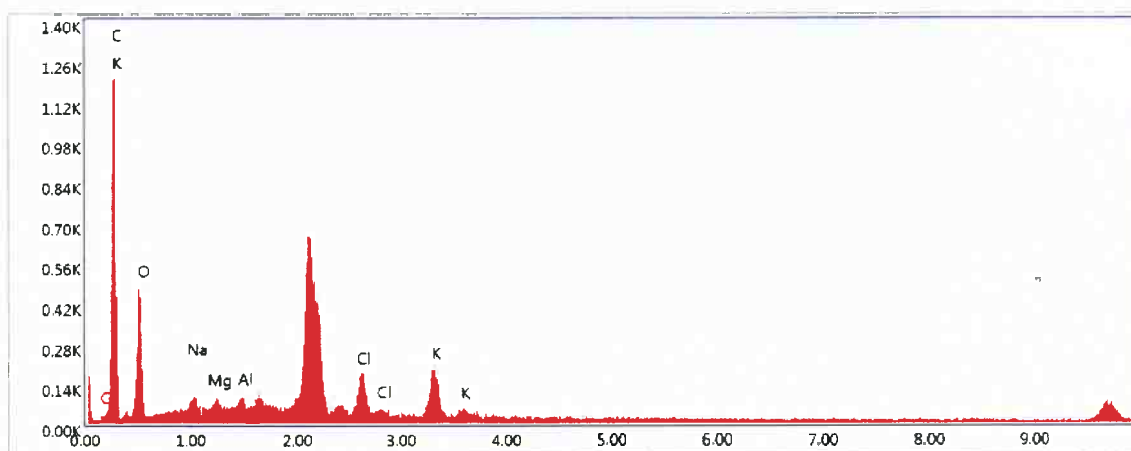


Figura 33 - Espectro de EDS ponto 2



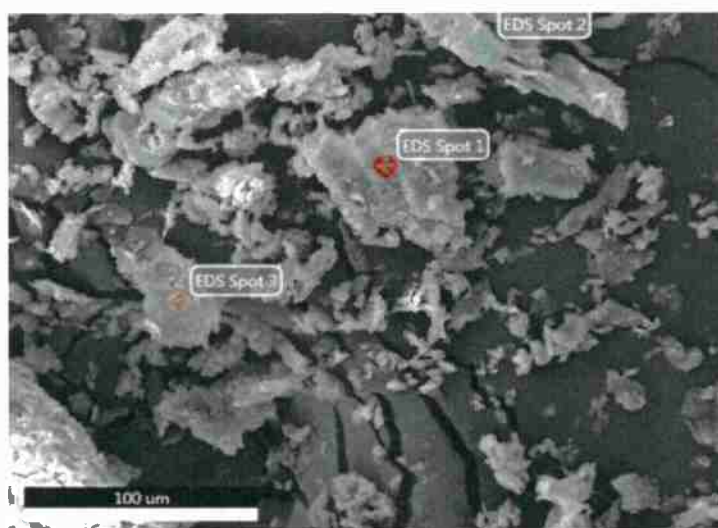
Assim, com o relatório final foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 31 - Resultados EDS amostra seca

Seca					
Ponto 1			Ponto 2		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
C	56,28	68,04	C	58,01	67,66
O	27,59	25,04	O	31,2	27,32
Na	1,75	1,11	Na	2,66	1,62
Mg	1,2	0,71	Mg	1,13	0,65
Cl	5,37	2,2	Al	0,91	0,47
K	7,81	2,9	Cl	2,33	0,92
			K	3,77	1,35

Para a amostra carbonizada a 200°C foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 34 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 200°C



Escolheu-se três estruturas de morfologias distintas para realizar a análise química. Desse teste foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 35 - Espectro de EDS ponto 1

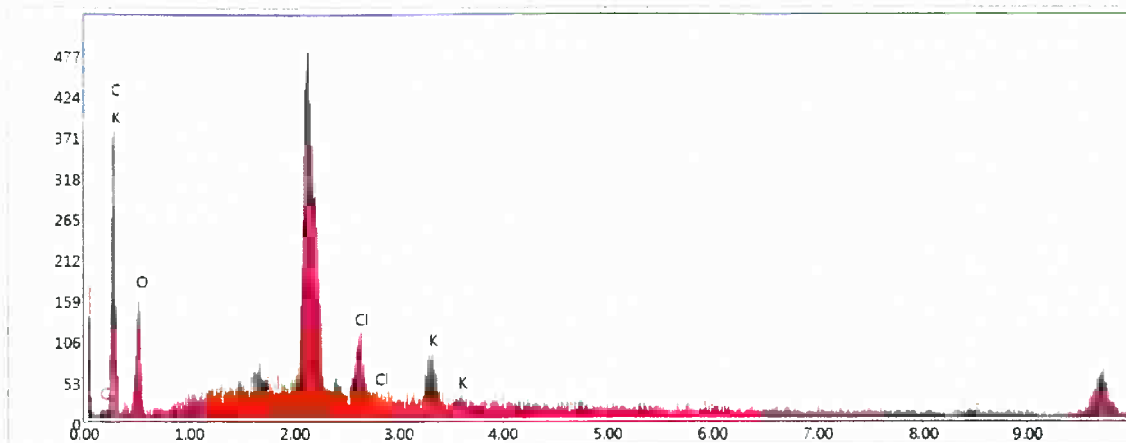


Figura 36 - Espectro de EDS ponto 2

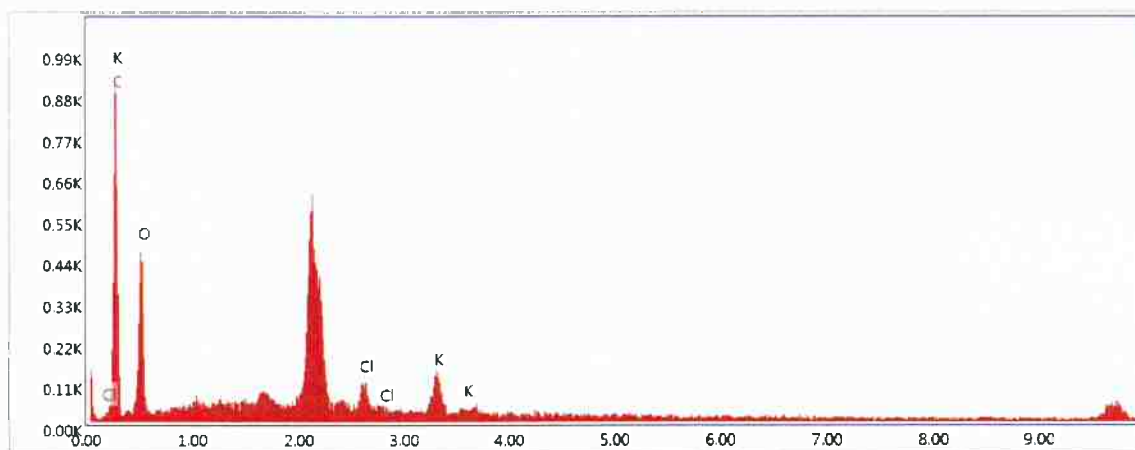
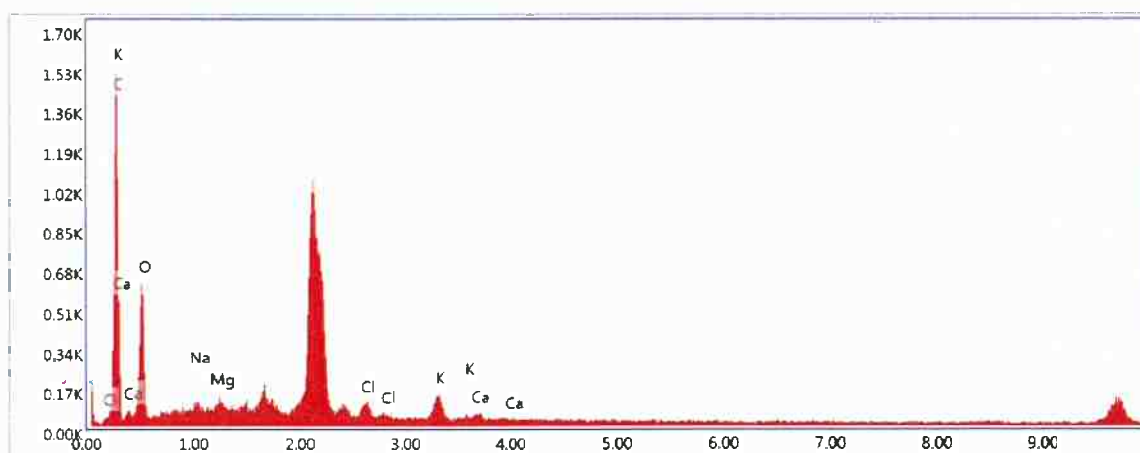


Figura 37 - Espectro de EDS ponto 3



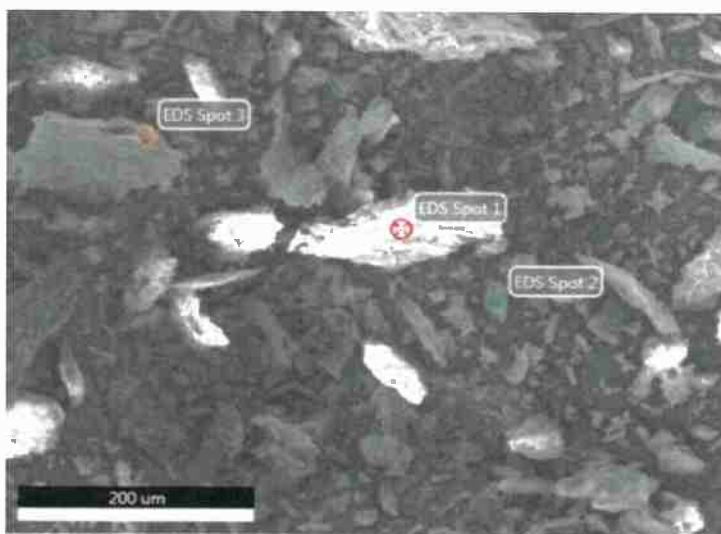
Com os espectros acima foi possível construir a tabela apresentada abaixo:

Tabela 32 - Resultados EDS amostra carbonizada 200°C

Carbonizada 200°C								
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
C	58,66	68,19	C	54,12	62,65	C	57,37	66,02
O	32,77	28,6	O	40,87	35,52	O	34,9	30,15
Cl	4,11	1,62	Cl	1,56	0,61	Na	2,97	1,79
K	4,46	1,59	K	3,44	1,22	Mg	1,57	0,89
						Cl	0,74	0,29
						K	1,92	0,68
						Ca	0,52	0,18

Para a amostra carbonizada a 300°C foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 38 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 300°C



Escolheu-se três pontos de morfologia distintas para análise química. Destes foram obtidos os seguintes resultados:

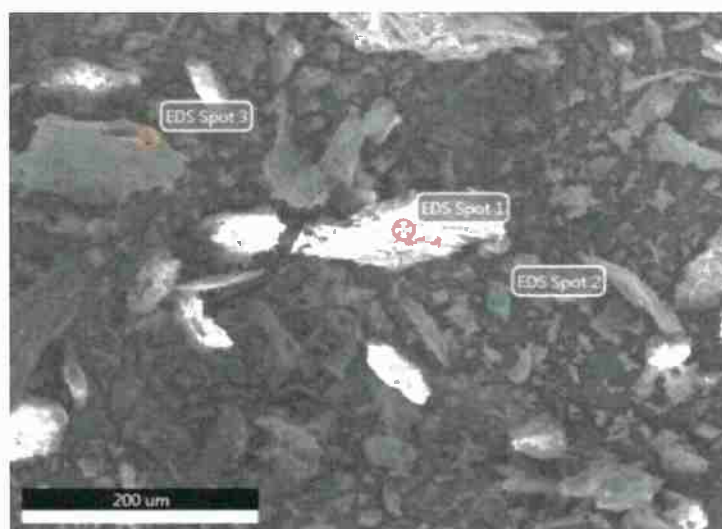


Tabela 32 - Resultados EDS amostra carbonizada 200°C

Carbonizada 200°C								
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
C	58,66	68,19	C	54,12	62,65	C	57,37	66,02
O	32,77	28,6	O	40,87	35,52	O	34,9	30,15
Cl	4,11	1,62	Cl	1,56	0,61	Na	2,97	1,79
K	4,46	1,59	K	3,44	1,22	Mg	1,57	0,89
						Cl	0,74	0,29
						K	1,92	0,68
						Ca	0,52	0,18

Para a amostra carbonizada a 300°C foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 38 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 300°C



Escolheu-se três pontos de morfologia distintas para análise química. Destes foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 39 - Espectro de EDS ponto 1

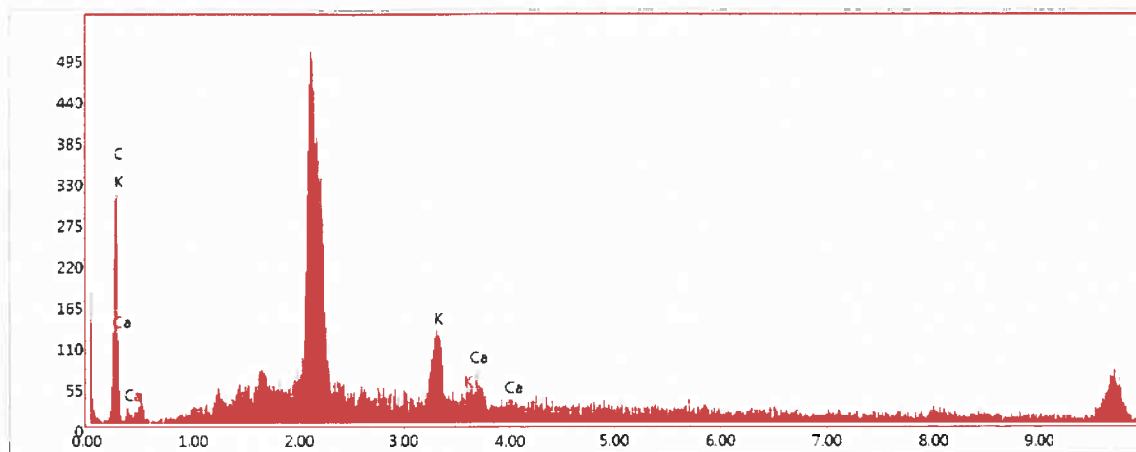


Figura 40 - Espectro de EDS ponto 2

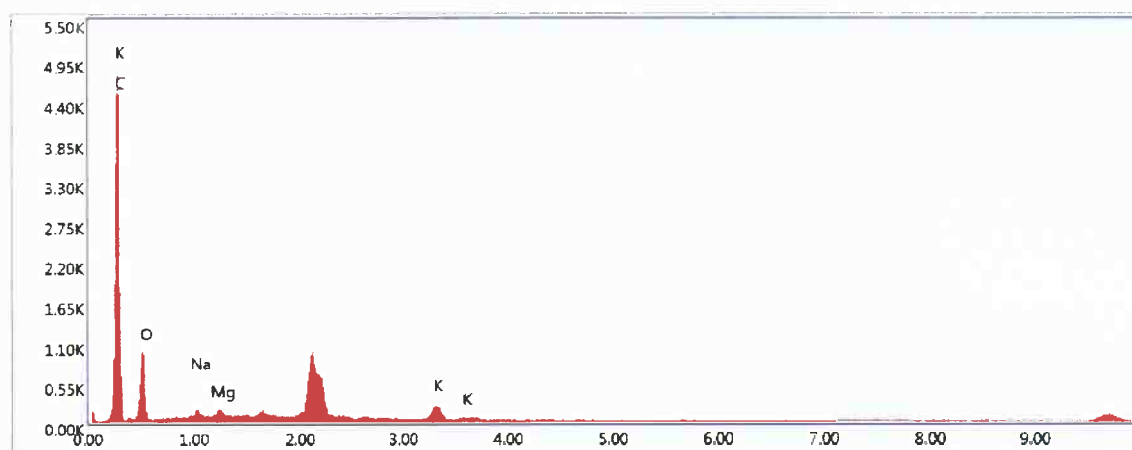
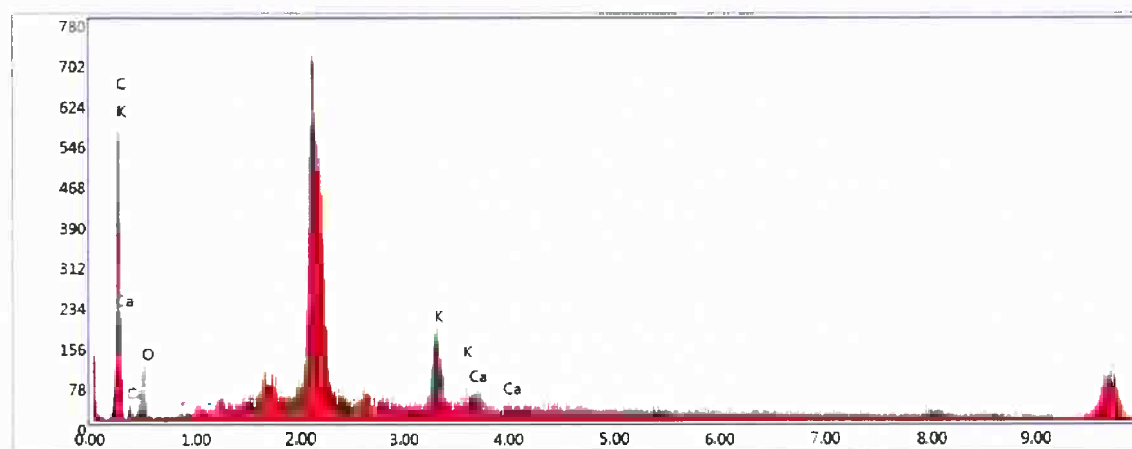


Figura 41 - Espectro de EDS ponto 3



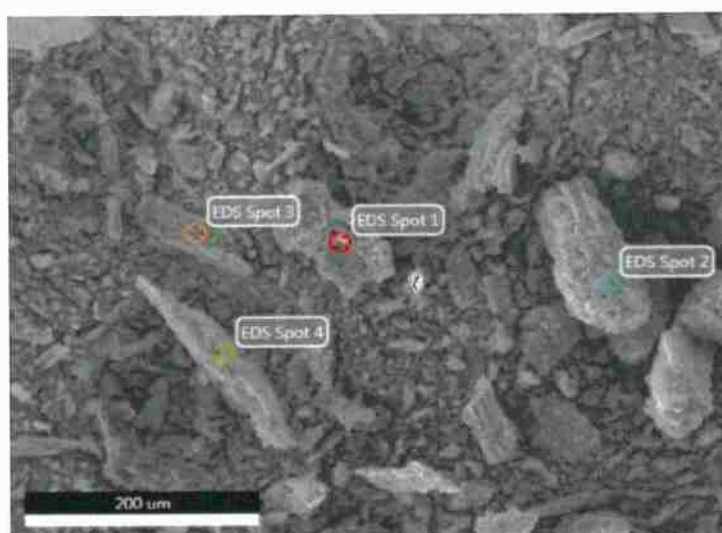
Assim, foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 33 - Resultados EDS amostra carbonizada a 300°C

Carbonizada 300°C								
Ponto1			Ponto 2			Ponto 3		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
C	67,76	87,34	C	68,45	75,4	C	57,69	69,37
K	21,14	8,37	O	27,35	22,62	O	28,2	25,45
Ca	11,1	4,29	Na	1,66	0,96	Ca	2,99	1,08
			Mg	0,84	0,46			
			K	1,69	0,57			

Para a amostra carbonizada a 500°C foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 42 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 500°C



Desta área escolheu-se quatro pontos de morfologias distintas. Deles, foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 43 - Espectro de EDS ponto 1

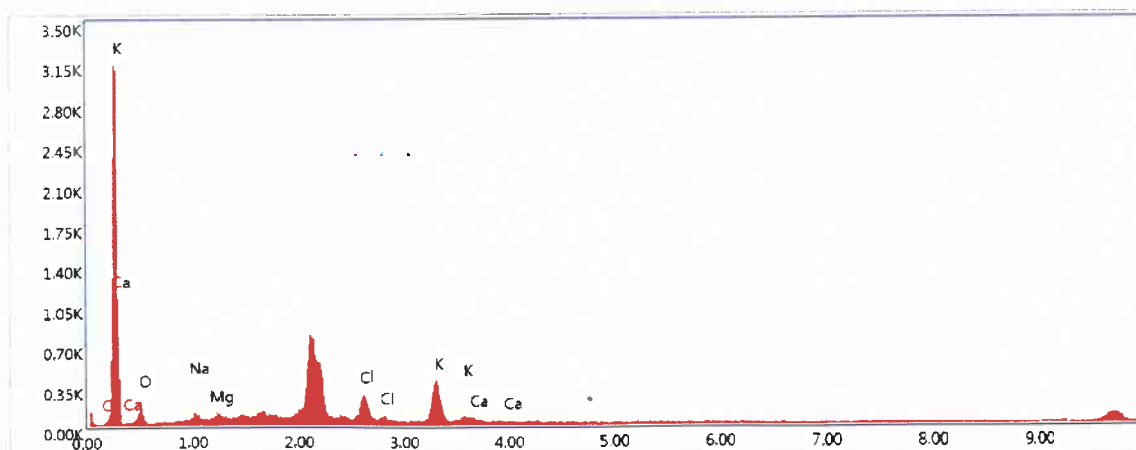


Figura 44 - Espectro de EDS ponto 2

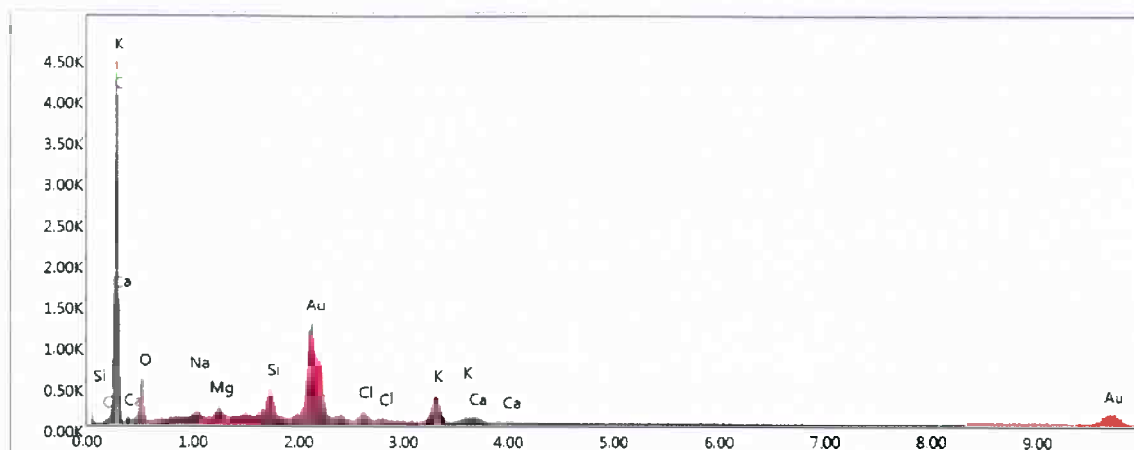


Figura 45 - Espectro de EDS ponto 3

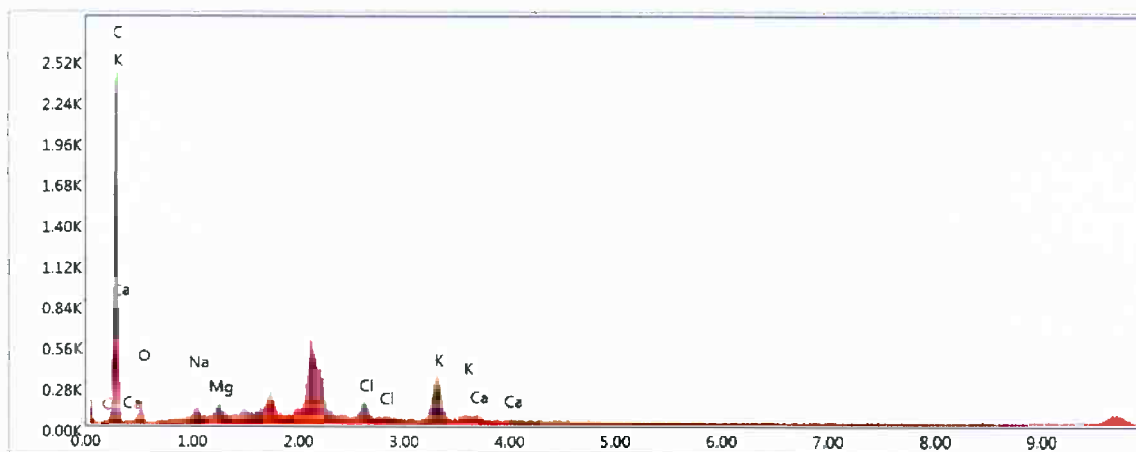
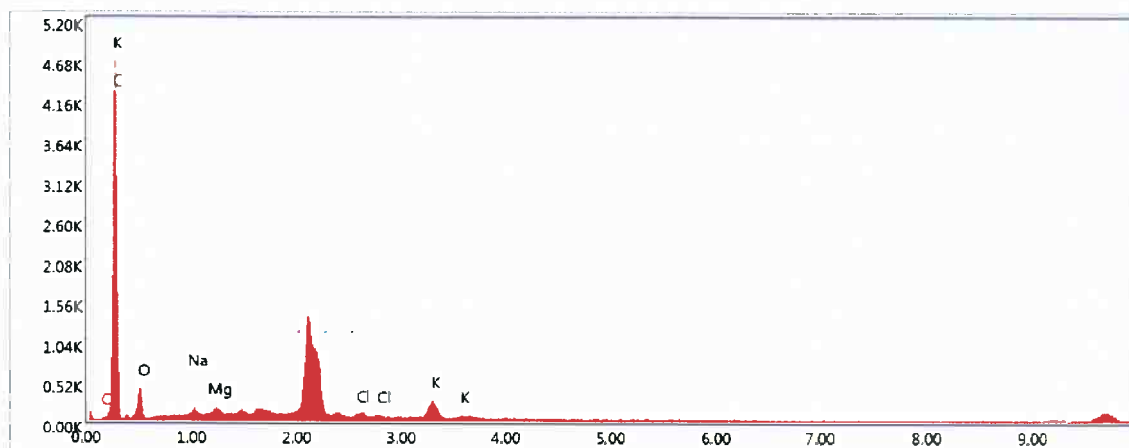


Figura 46 - Espectro de EDS ponto 4



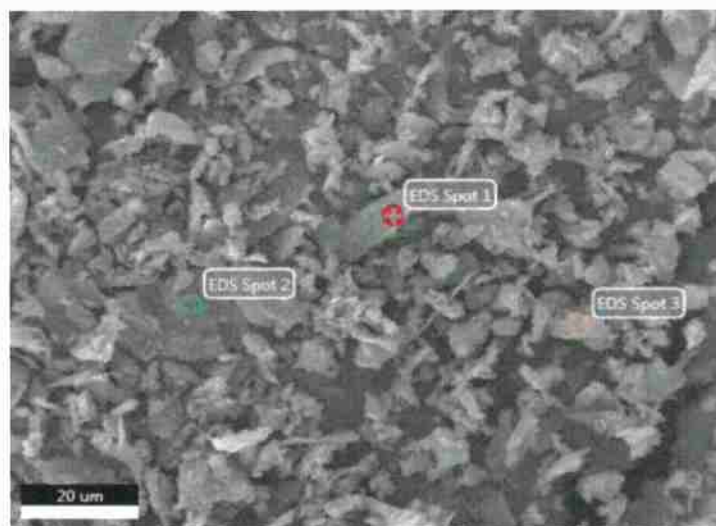
Assim, foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 34 - Resultados EDS amostra carbonizada a 500°C

Carbonizada 500°C											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
O	42,35	60,25	C	58,35	82,81	C	77,71	86,33	C	78,79	84,72
Na	8,82	8,73	O	10,82	11,53	O	11,15	9,3	O	16,4	13,24
Mg	5,21	4,88	Na	1,04	0,77	Na	1,36	0,79	Na	1,23	0,69
Cl	13,06	8,39	Mg	0,67	0,47	Mg	0,94	0,52	Mg	0,74	0,4
K	27,59	16,06	Si	1,26	0,77	Cl	1,64	0,62	Cl	0,36	0,13
Ca	2,97	1,69	Cl	0,62	0,3	K	6,33	2,16	K	2,47	0,82
			K	2,29	1	Ca	0,88	0,29			
			Ca	0,56	0,24						
			Au	24,38	2,11						

Para a amostra carbonizada a 700°C foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 47 - Área usada para EDS da amostra carbonizada a 700°C



Assim, escolheu-se três estruturas de morfologias distintas para realizar a análise química. Obtiveram-se os seguintes resultados:

Figura 48 - Espectro de EDS ponto 1

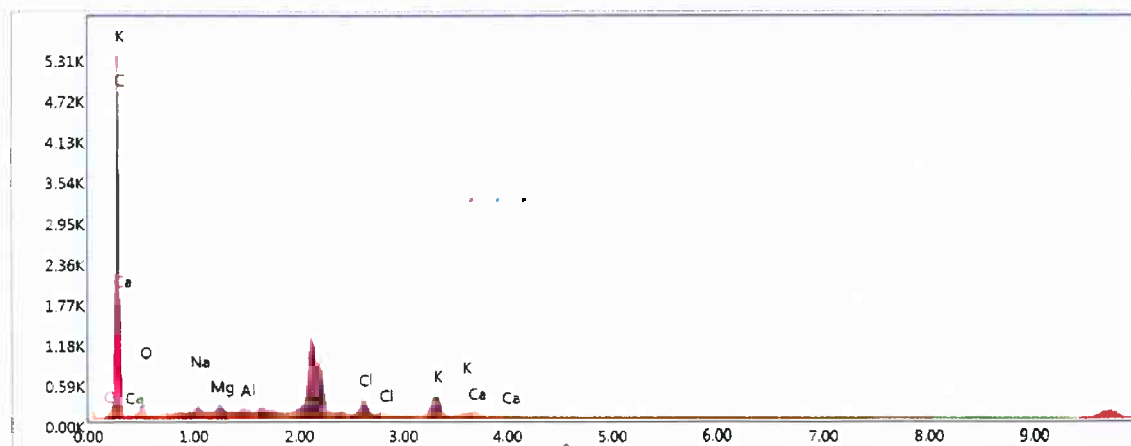


Figura 49 - Espectro de EDS ponto 2

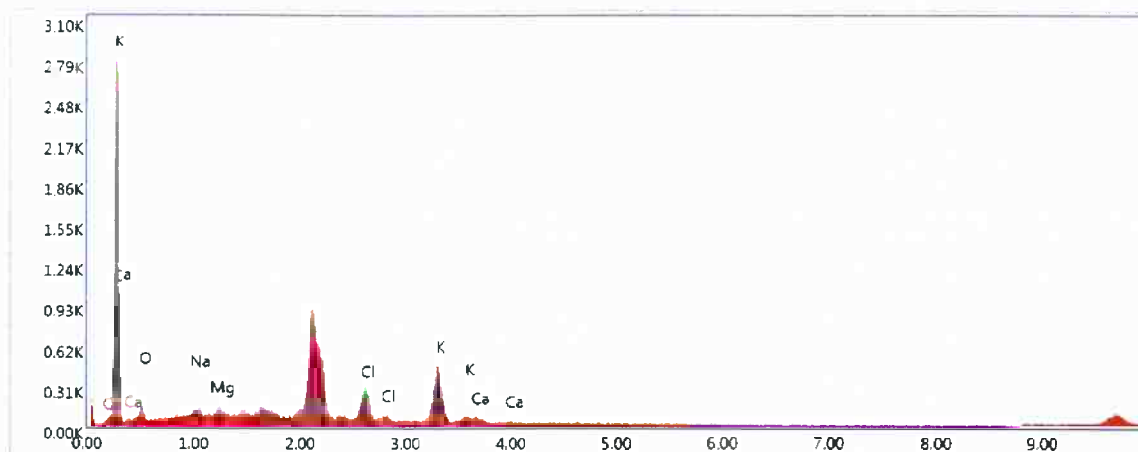
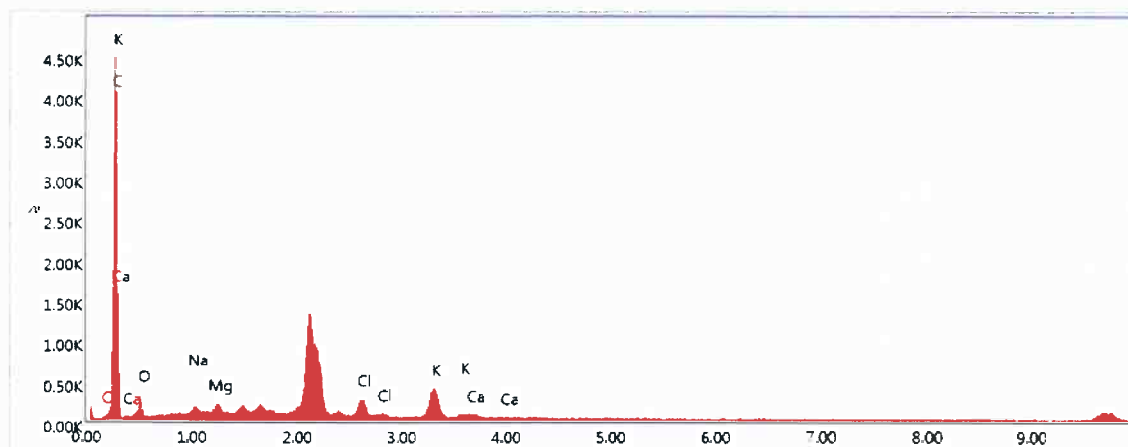


Figura 50 - Espectro de EDS ponto 3



Assim foi possível construir a tabela abaixo:

Tabela 35 - Resultados EDS amostra carbonizada a 700°C

Carbonizada 700°C								
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos	Elemento	% em massa	% em átomos
C	79,67	87,17	O	29,75	45,18	C	79,14	86,54
O	10,48	8,61	Na	14,87	15,71	O	11,88	9,76
Na	2,12	1,21	Mg	10,36	10,35	Na	1,76	1
Mg	1,23	0,67	Cl	12,93	8,86	Mg	1,07	0,58
Al	0,71	0,35	K	28,49	17,7	Cl	1,65	0,62
Cl	1,65	0,61	Ca	3,6	2,18	K	3,93	1,32
K	3,33	1,12				Ca	0,59	0,19
Ca	0,81	0,27						

Analisando por completo os resultados apresentados pelas cinco amostras de coco verde notam-se que na grande maioria delas as porcentagens em massa e de átomos de carbono e de oxigênio foram bastante elevadas, por se tratar de um

composto orgânico. Além disso, alguns compostos minerais como Na, K, Mg e Ca também eram esperados, pois se tratam de sais minerais contidos na água de coco e, como a amostra é composta pelo albúmen, a existência deles nos resultados está de acordo com os resultados. No entanto, alguns compostos como Au, Si e Al foram completas surpresas nos resultados apontados. Sabe-se que o Au deve ser do revestimento metálico obrigatório devido ao tipo de amostra analisada para realização do MEV e do EDS. No caso do Si, uma das evidências seja de contaminação em uma caixa de areia usada para o resfriamento de peças no Laboratório de Redução do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Para o Al nenhuma resposta foi encontrada. Além disso, cloretos também são compostos usualmente encontrados em água de coco.

Joelia Marques de Carvalho, em um artigo publicado em 2006, analisa a composição química da água de coco. Para corroborar as evidências descritas acima, expõe-se duas tabelas que trazem um resumo de concentrações normais desses elementos minerais em amostras de água de coco.

Tabela 36 - Concentrações de diferentes minerais encontrados na água de coco para diferentes períodos de maturação

Mês	Fe (mg/100mL)	Ca (mg/100mL)	K (mg/100mL)	Mg (mg/100mL)	Na (mg/100mL)	P (mg/100mL)	Vitamina C (mg/100g)
5º	0,03 a 0,04	13 a 25	148 a 231	6,1 a 14	5,1 a 6,9	1,2 a 4,8	1,7 a 3,9
6º	0,03 a 0,05	9,9 a 16	102 a 192	8,3 a 14	8,7 a 12	4,6 a 7,9	19,7 a 94,3
7º	0,06 a 0,09	10 a 24	143 a 191	3,8 a 12	4,7 a 9	2,5 a 5,2	N.E
8º	0,04 a 0,07	12 a 25	189 a 248	3,7 a 11	5,8 a 17	4,1 a 7,5	1,8 a 4,8
9º	0,05 a 0,09	8,5 a 21	178 a 296	5,7 a 23	9,2 a 20	2 a 22	N.E a 3,4
10º	0,05 a 0,07	10 a 19	150 a 190	3,1 a 9,6	15 a 31	5,2 a 8,5	N.E a 1,7
11º	0,03 a 0,05	13 a 19	144 a 216	4,3 a 9,1	18 a 29	4,5 a 8,3	N.E 1,7
12º	0,03 a 0,08	10 a 21	127 a 260	3 a 15	15 a 55	5,1 a 9,7	N.F

Tabela 37 - Comparação entre a composição média das bebidas para o esporte (isotônicos) e a água-de-coco.

Constituintes	Bebida para o esporte (isotônicos) (mg/100 mL)	Água-de-coco (mg/100 mL)
Potássio	11,7	294
Sódio	41	25
Cloreto	39	118
Magnésio	7	10
Açúcares	6	5

Fonte: (MARQUES DE CARVALHO e colab., 2006)

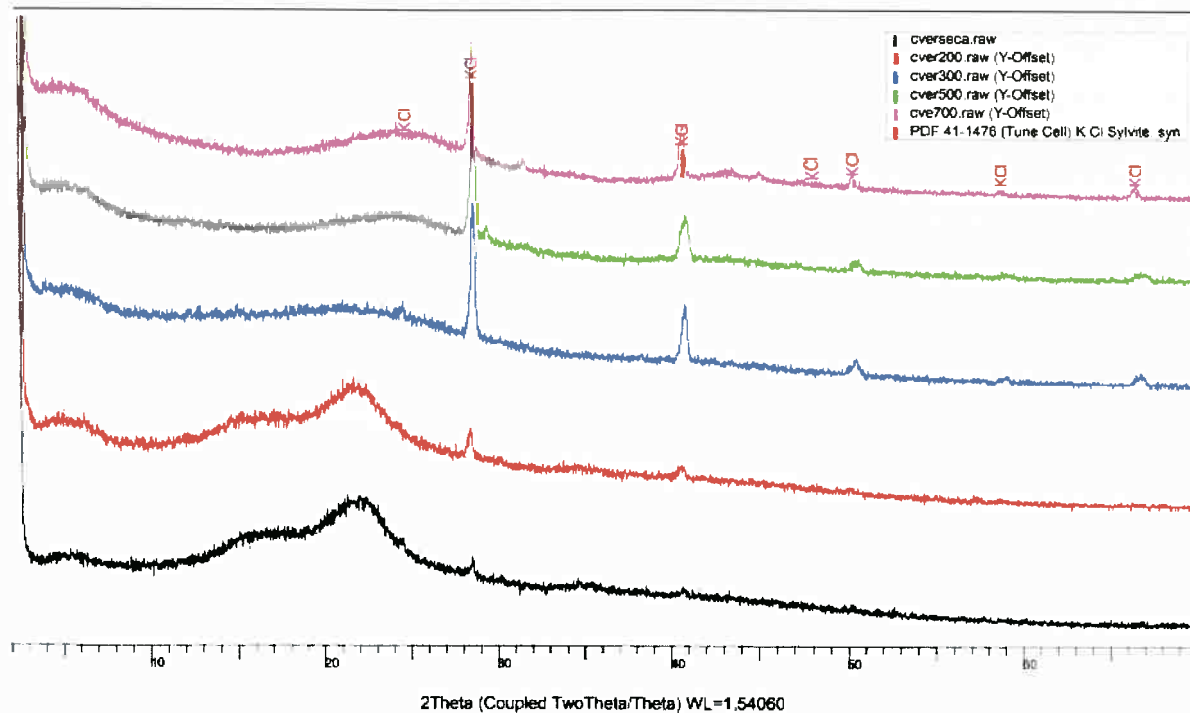
Dessa forma explica-se a ocorrência de uma gama ampla de elementos químicos extras ao que se esperava usualmente de uma matéria orgânica.

#### 4.7 Difração de raio-X (DRX)

Por último, a análise DRX nos deu como resultado o difratograma abaixo:

Figura 51 - Difratoograma amostras de coco verde

## cverdeseca (Coupled TwoTheta/Theta)



Analisando o difratograma acima é possível concluir que ocorreu um processo de cristalização de KCl com o aumento da temperatura, sendo possível identificar o aumento da fase cristalina com a temperatura. Além disso, com o aumento da temperatura, a mudança de linha base, que se relaciona com a parte amorfa das amostras, tornou-se cada vez menor com o aumento da temperatura. Essa mudança da linha base foi mais evidente para as amostras seca (linha preta) e carbonizada a 200°C (linha vermelha).



## 5 CONCLUSÃO

A produção e comercialização brasileira de coco demonstram uma significativa evolução nos últimos anos, não só em termos de cultivo, mas principalmente no avanço em áreas não tradicionais de plantio. Tudo isso coloca o país na quarta colocação mundial entre os maiores produtores.

Assim, todo esse volume de produção gera uma quantidade de resíduos de coco verde bastante elevado também. Tratando-se de um material quase inerte algumas destinações já são conhecidas para ele, como a fabricação de chapéu e acolchoados na indústria automobilística. O aproveitamento energético seria mais uma opção de uso desse resíduo

Dessa forma, a tecnologia de pirólise se torna prestigiada pelo motivo de utilizar rejeitos das mais variadas atividades e por produzir soluções renováveis de energia. E, pensando nos vários tipos, escolhe-se pelo uso da pirólise lenta pois privilegia a produção de carvão vegetal.

Os resultados deste trabalho identificaram a viabilidade técnica de se aproveitar o coco verde, da espécie *Cocos nucifera*, como matéria-prima para produção de carvão vegetal para uso comercial, pois, para uso metalúrgico o teor de carbono fixo deveria ser entre 85-90%, porcentagem essa plenamente atendida pelo carvão mineral.

Assim, chegou-se à conclusão que há um ponto ótimo para produção do carvão (maior rendimento x teor de carbono fixo) e ele encontra-se por volta dos 310°C, ou seja, a intersecção entre o máximo carbono fixo (57%) e o máximo rendimento energético (70%).

A temperatura de pirólise, sem dúvida, trata-se do parâmetro que mais tem influência na qualidade final do carvão. Ela é a responsável por características como os teores de volátil e de cinzas, que resultam no carbono fixo e, conseqüentemente, no poder calorífico.

Tratando-se do poder calorífico se verificou que há inúmeras formas de medi-lo e, mesmo aquele que considera o teor de voláteis ser o mais fácil de se utilizar, o mais confiável foi o medido experimentalmente. Deste dado foi possível chegar a equação que calcula o PCS em função do teor de carbono fixo para o caso particular do *Cocos nucifera*.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, Azarias Machado De e colab. **Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal**. Revista *Árvore*, v. 28, n. 5, p. 707–714, 2004.
- AZAR, Christian e colab. **Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass - Costs and potential role in stabilizing the atmosphere**. *Climatic Change*, v. 74, n. 1–3, p. 47–79, 2006.
- DE ASSIS DA, Francisco e colab. **Pirólise Da Biomassa Lignocelulósica: Uma Revisão Pyrolysis of Lignocellulose Biomass: a Review**. Revista *Geintec*, v. 5, n. 4, p. 2511–2525, 2015.
- FROEHLICH, Anderson Gheller e LUPPI, Lierge e MORAES, Suzana De. **UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA MADEIREIRA DE ARIPUANÃ-MT**. VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2012.
- KARNA, Priya e colab. **Synthesis and Characterization of Carbon Nanospheres**. *OALib*, v. 04, n. 05, p. 1–7, 2017. Disponível em: <<http://www.oalib.com/paper/pdf/5285254>>.
- KUMAR, M. e JENA, S. **Influence of carbonization conditions on the properties of coconut shell chars**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 28, n. 5, p. 423–431, 2006.
- LI, Wei e colab. **Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars**. *Industrial Crops and Products*, v. 28, n. 2, p. 190–198, 2008.
- MARQUES DE CARVALHO, Joelia e colab. **Água-de-coco: Propriedades nutricionais, funcionais e processamento Water of coconut: Nutritional and functional properties and processing**. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 27, n. 3, p. 437–452, 2006. Disponível em: <[http://www.uel.br/proppg/portal/pages/arquivos/pesquisa/semina/pdf/semina\\_27\\_3\\_19\\_13.pdf](http://www.uel.br/proppg/portal/pages/arquivos/pesquisa/semina/pdf/semina_27_3_19_13.pdf)>.
- MARTINS, C. R. e JUNIOR, L. A. J. **Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014**. Comitê Local de Publicações da Embrapa Tabuleiros Costeiros, v. 1, n. 1, p. 53, 2014. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/897921>>.
- MORALES, Virgilio S. e ELAURIA, Jessie C. e ELAURIA, Marilyn M. **Carbonization of young coconut (*Cocosnucifera*) wastes**. *Nihon Enerugi Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Energy*, v. 94, n. 10, p. 1120–1128, 2015.
- MOTA, Francisco de Assis da Silva e colab. **A BIOMASSA DO COCO VERDE (*Cocos nucifera*)**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC' 2015, 2015.
- PADILLA, Elias Ricardo D e colab. **Potencial Energético da Casca de Coco (*Cocos nucifera* L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise**. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 2, p. 12, 2018.
- PIMENTA, Alexandre Santos e colab. **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE COCO**

**(Cocos nucifera) CARBONIZADO PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETES.** *Ciencia Florestal*, v. 25, n. 1, p. 137–144, 2015.

PROTÁSIO, Thiago de P. e colab. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 11, p. 1252–1258, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662012001100015&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012001100015&lng=pt&tlng=pt)>.

TEIXEIRA DO VALE, AILTON; GENTIL, LUIZ VICENTE; GONÇALEZ, JOAQUIM CARLOS; FLORIAN DA COSTA, Alexandre. **Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*).** *CERNE*, p. 6, 2007.

VALE, AILTON TEIXEIRA DO; ABREU, VERA LÚCIA SILVA; GONÇALEZ, JOAQUIM CARLOS; DA COSTA, Alexandre Florian. **Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis.** *Brasil Florestal*, v. 73, 2002.

VALE, Ailton Teixeira Do e QUIRINO, Rodrigo Almeida Barroso e Waldir Ferreira. **CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA E DO CARVÃO VEGETAL DO COCO-DA-BAÍÁ (*Cocos nucifera* L.) PARA USO ENERGÉTICO.** *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 4, p. 365–370, 2004.

VALE, Teixeira e colab. **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas* ).** *CERNE*, p. 8, 2011.

XUE, Junjie e colab. **Enhancing biomass + coal Co-firing scenarios via biomass torrefaction and carbonization: Case study of avocado pit biomass and Illinois No. 6 coal.** *Renewable Energy*, v. 122, p. 152–162, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.066>>.

ZAKARIA, S. e colab. **Burner Characteristics for Activated Carbon Production.** *MATEC Web of Conferences*, v. 87, p. 1–6, 2016.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **BIOMASSA para energia.** Campinas: Editora UNICAMP, 2008.

## ANEXO

### Estudo de caso do volume de coco verde vendido semanalmente no parque do Ibirapuera

No início deste trabalho, na fase de levantamento de dados, entrei em contato com a cooperativa responsável pelos cocos verdes vendidos no parque do Ibirapuera. Inicialmente, minha proposta era mapear todo o caminho que esse coco percorria, desde a sua produção até a reutilização do resíduo gerado. No entanto, a cooperativa era responsável apenas pela entrega do coco verde no parque e pela retirada das cascas após o consumo da água e, por alguns, do albúmen. Assim, eles só sabiam me informar a atividade relacionada a eles.

Em uma conversa informal com uma das funcionárias dessa, cujo nome é Natalia, ela me informou o volume semanal de cocos vendidos no parque. Com essa informação foi possível produzir a tabela abaixo:

Dia da semana	Quantidade média (unidades)
Segunda-feira	500
Terça-feira	500
Quarta-feira	500
Quinta-feira	500
Sexta-feira	500
Sábado	2500
Domingo	

Da quantidade listada acima, uma observação relevante é que, segundo a Natalia, nos meses de verão há uma flutuação na quantidade vendida aos finais de semana e esse número chega a 3500 unidades em média.

Assim, sendo a quantidade total de segunda-feira a sexta-feira igual a 2500 unidades em média e aos finais de semana, considerando a flutuação nos meses de verão, igual a 3000 unidades em média. Com a quantidade total semanal de 5500 cocos verdes e, com os dados obtidos na parte experimental desse trabalho, sabe-se que a massa média, em quilogramas, de um coco verde sem a água é 1.09kg. Assim, calcula-se a massa total de resíduo:

$$m = 5500 \times 1,09 \rightarrow m = 5990,82kg$$

Segundo os dados consultados em literatura, que são bastantes próximos dos conseguidos experimentalmente, em média 85% em massa de um coco verde é umidade. Assim, o peso seco é 898.62kg.

Com o resultado analisado no gráfico 7, chegou-se à conclusão que a temperatura ótima para produção de carvão é 310°C. Nessa temperatura, o rendimento gravimétrico é de cerca de 52%. Assim, a massa de carvão produzida é:

$$m_{carvão} = 898,62 \times 52\% \rightarrow m_{carvão} = 467,28kg$$

Com a equação 8 foi possível calcular o PCS para uma amostra de carvão carbonizada a 310°C. Assim, PCS(310°C) = 5608.62kcal/kg.

Tendo a massa de carvão produzida e o PCS teórico é possível calcular a quantidade de energia produzida com a queima desse carvão:

$$E = 476,28 \text{ kg} \times \frac{5608,62 \text{ kcal}}{1 \text{ kg}} \rightarrow E = 2620819,02 \text{ kcal}$$

Fazendo a conversão de kcal para kWh, temos:

$$E = 2620819,02 \text{ kcal} \times \frac{0,00116222 \text{ kWh}}{1 \text{ kcal}} \rightarrow E = 3045,97 \text{ kWh}$$

Como conclusão desse trabalho o carvão vegetal do coco verde teria o uso comercial como destino, já que o uso metalúrgico exige uma porcentagem superior de carbono fixo, um possível uso seria no forno a lenha em pizzarias, já que se trata de um produto amplamente consumido na cidade de São Paulo.

Com dados colhidos na internet, assar uma pizza consome cerca de 0.015kWh. Assim, seria possível calcular o número de pizzas assadas apenas com o carvão produzido com o volume de vendas semanal no parque do Ibirapuera.

$$n_{pizzas} = 3045,97 \text{ kWh} \times \frac{1 \text{ pizza}}{0,015 \text{ kWh}} \rightarrow n_{pizzas} = 203064 \text{ pizzas.}$$

Em uma visita realizada a pizzaria “Santa Marcelina Pizzas”, localizada no bairro Alto da Boa Vista, na cidade de São Paulo, o gerente me informou que cerca de 33200 pizzas são assadas mensalmente.

$$t = 203064 \text{ pizzas} \times \frac{1 \text{ mês}}{33200 \text{ pizzas}} \rightarrow t = 6,116 \dots \text{meses}$$

Portanto, o volume semanal do parque do Ibirapuera seria suficiente para abastecer, com carvão vegetal usado na fornalha, a pizzaria por mais de 6 meses.

### **Observações**

A escolha da pizza para aplicar ao volume de coco verde vendido no parque se trata apenas de uma situação ilustrativa. Escolheu-se tal produto pois é de amplo consumo na cidade de SP e tem como carvão vegetal um insumo importante na cadeia produtiva.

Além disso, nenhuma importância econômica foi dada ao caso, como o custo logístico para transporte do coco verde até um centro de pirólise ou até mesmo o custo de produção desse carvão. O caso atentou-se apenas ao viés da disponibilidade energética ligado ao volume de cocos semanal no parque do Ibirapuera e uma aplicação.