GUILHERME HUASKAR WITÉE CARDOSO

**OBTENÇÃO DE CARVÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS
ALIMENTARES**

SÃO PAULO

2017

GUILHERME HUASKAR WITÉE CARDOSO

**OBTENÇÃO DE CARVÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS
ALIMENTARES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda
Mourão

SÃO PAULO
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Cardoso, Guilherme Huaskar Wittée

Obtenção de carvão de resíduos sólidos orgânicos alimentares / G. H. W. Cardoso -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

94 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Carbonização 2. Carvão de biomassa 3. Resíduos alimentares
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

AGRADECIMENTOS

Bolsa de mestrado por desempenho acadêmico Capes PROEX, por Bolsa de Mestrado número 1438903

O meu orientador, o Professor Doutor Marcelo Mourão pela orientação no trabalho. Agradeço também a valiosa ajuda no trabalho oferecida pelo também Professor Doutor Flavio Beneduce.

A ajuda nos experimentos dos técnicos Gustavo e Cristiano, e do colega Cesar Narita.

Agradeço também aos meus familiares e pessoas especiais pelo apoio: o meus pais Mário e Rosângela Cardoso, o meu irmão Vinicius Cardoso, e Jenny Weagle.

RESUMO

Os resíduos orgânicos alimentares são um tipo de resíduo de difícil aproveitamento. Milhões de toneladas de lixo orgânico são descartados todos os anos, sobretudo os de origem alimentar, sendo que boa parte não é reaproveitada. Tradicionalmente, quando reaproveitados, esses resíduos são destinados à compostagem. No entanto, para que esse processo seja bem-sucedido, é necessário que os resíduos sejam separados corretamente a fim de que a qualidade do produto final seja aceitável para o uso como fertilizante.

Uma alternativa proposta de utilização dos resíduos alimentares consiste na produção de material carbonáceo obtido pela carbonização ou torrefação destes.

Avaliam-se as propriedades e as características qualitativas e quantitativas desses materiais carbonáceos e seus derivados, como a composição, a resistência mecânica e a microestrutura. Tenciona-se, desse modo, contribuir para o conhecimento das possíveis aplicações desses carvões, materiais carbonosos e derivados em diversas áreas da indústria, inclusive na siderúrgica.

ABSTRACT

Millions of tons of organic waste are discarded every year, especially from food sources, and most of it is not reused. Traditionally, when reused, this kind of waste is destined for composting. However, for that procedure to be successful it is necessary that the waste is properly separated so that the quality of the final product is acceptable for fertilizer.

An alternative reuse of food waste constitutes obtaining carbonaceous material by carbonization or torrefaction of this material. This work studies the charcoalmaking that uses these kind of residues, the characteristics of charcoals obtained, and the possible applications for these carbonaceous materials.

The properties and the qualitative and quantitative characteristics of this object of study, such as its composition, its mechanical resistance and its microstructure, are evaluated. It is intended to contribute to the knowledge of the possible applications of these charcoals in several areas of industry, including in the steel industry.

SUMÁRIO

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 Resíduos sólidos orgânicos	9
3.1.1 Classificação de resíduos sólidos.....	9
3.1.2 Resíduos da produção de alimentos	10
3.1.3 Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos	11
3.2 Constituintes orgânicos dos alimentos.....	12
3.2.1 Proteínas e aminoácidos	12
3.2.2 Lipídeos e gorduras	14
3.2.3 Carboidratos e amido.....	15
3.3 Processos de carbonização	22
3.3.1 Carbonização e torrefação de biomassa	22
3.3.2 Coqueificação	23
3.3.3 Carbonização da madeira.....	23
3.3.4 Influência da queima dos materiais carbonosos no aquecimento global	25
3.3.5 Carbonização do lixo orgânico.....	28
3.3.6 Carbonização do amido	28
3.3.7 Carbonização dos resíduos alimentares	31
3.4 Moagem	32
3.4.1 Moagem manual	32
3.4.2 Moagem em moinho de bolas.....	32
3.4.3 Moagem por extrusão	33
3.4.4 Moagem por moinho de café	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 Obtenção de lixo orgânico alimentar	34
4.2 Componentes alimentares dos resíduos orgânicos estudados	34
4.3 Obtenção de lixo orgânico alimentar sintético	35
4.3.1 Preparo dos componentes da mistura.....	36
4.3.2 Mistura dos componentes.....	37
4.4 Moagem	38
4.5. Classificação granulométrica	38
4.6 Briquetagem.....	38

4.7 Obtenção de carvões de resíduos orgânicos alimentares	39
4.7.1 Torrefação e carbonização dos resíduos alimentares coletados	40
4.7.2 Torrefação e Carbonização dos resíduos alimentares sintéticos	41
4.7.3 Recarbonização	41
4.8 Análise de voláteis e análise química imediata	42
4.9 Análise química por fluorescência de raios X.....	42
4.10 Teste de Resistência Mecânica dos Briquetes.....	42
 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	 43
5.1 Resíduos orgânicos colhidos	43
5.1.1 Caracterização	43
5.1.2 Secagem dos resíduos	44
5.1.3 Moagem	44
5.1.4 Carbonização dos resíduos colhidos	45
5.1.5 Caracterização dos resíduos colhidos	46
5.2 Resíduos orgânicos sintéticos	50
5.2.1 Preparo	50
5.2.2 Características	51
5.2.3 Processamento dos resíduos sintéticos	51
5.2.4 Caracterização dos carvões de resíduos sintéticos	55
5.2.5 Carvões recarbonizados	68
5.2.6 Torrefação por tempo prolongado.....	70
5.3 Análises comparativas dos Resíduos orgânicos	75
5.3.1 Análise química dos resíduos orgânicos alimentares.....	75
5.3.2 Rendimento da carbonização dos resíduos orgânicos alimentares	76
5.4 auto redução	77
5.4.1 Pelota auto-redutora	77
5.4.2 Teor de carbono fixo teórico.....	78
5.4.3 Perda de massa	78
5.4.4 Estrutura e resistência mecânica	79
5.4.5 Análise de redução e microestrutura do reduzido.	80
 6 CONCLUSÕES	 84
8 BIBLIOGRAFIA	86

1 INTRODUÇÃO

O lixo orgânico é destinado principalmente à compostagem com o intuito de melhorar as condições do solo para plantio, porém, se a separação for incorreta, o uso dos resíduos sólidos urbanos torna-se bastante prejudicado [1]. O resíduo alimentar, um tipo de resíduo orgânico, constitui essa fração de difícil reaproveitamento, cujo agravante é que milhões de toneladas desse resíduo são gerados anualmente.

O carvão vegetal no Brasil é proveniente de florestas plantadas para esse fim, constituídas basicamente por espécies de eucaliptos, ou de derrubada de mata nativa. Contudo, os processos de obtenção desse carvão são muitas vezes rudimentares e geram impactos sociais negativos.

Por outro lado, o carvão mineral coqueificável por se tratar de um insumo energético não encontrado no Brasil deve ser importado. Além disso, não é renovável e emite CO₂. A obtenção de agregados autorredutores contendo materiais carbonáceos alternativos possui grande importância para a redução da dependência de carvão metalúrgico.[2]

Em face do exposto, o uso de carvão proveniente de lixo orgânico não apenas poderia contribuir para reduzir o impacto ambiental e social, bem como diminuir a dependência por carvão mineral e, por extensão, a produção de resíduos orgânicos, o impacto ambiental negativo e a necessidade de novos aterros sanitários.

2 OBJETIVOS

Estudar a obtenção de carvão a partir de resíduos alimentares, suas propriedades e características, a saber: a resistência mecânica, a composição, e a microestrutura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

3.1.1 Classificação de resíduos sólidos

Os resíduos alimentares são um tipo de resíduo sólido, mais precisamente um resíduo sólido orgânico. A classificação dos resíduos sólidos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), abrange as suas características físicas (secos ou molhados e etc), classifica de acordo com a sua composição química (orgânico ou inorgânico), assim como a sua origem (domiciliar, comercial, de serviços públicos, hospitalar, industrial, aeroportos etc.). Outras características dos resíduos sólidos compreendem a sua composição gravimétrica, sua compressividade e as características do chorume.

A definição dada para resíduos pela norma ABNT 10004/2004 é categórica: “(...) *Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (...)*”[3].

A compressividade representa o fator de compactação do resíduo a uma pressão aplicada de 4 kg/cm² [4]. Enquanto o chorume é a denominação do líquido emanado dos resíduos que varia em quantidade conforme o tipo de resíduo e a quantidade de água passante. E a sua composição depende da natureza do resíduo.

O chorume é um líquido que emana dos resíduos sólidos e carrega substâncias provenientes do resíduo de origem. Portanto trata se de um agente poluidor, pois tem o potencial de carregar substâncias nocivas para os corpos de água .

Segundo a ABNT, os resíduos são classificados em I,IIa e IIb.Os resíduos classe I são aqueles que apresentam periculosidade em virtude de suas

propriedades, ou seja, a inflamabilidade, a corrosividade, a reatividade, a toxicidade, a patogenicidade, etc. Os resíduos classe IIa são os não perigosos e não inertes. Isso se deve ao fato que quando em contato com a água, libera substâncias perigosas em determinado grau que não chega a ser da classe I, mas, ainda assim, oferece algum tipo de risco quando lançado na natureza. Os resíduos da classe IIb são aqueles que não apresentam periculosidade e em contato com a água não chegam a liberar substâncias contaminantes em quantidades significativas [5].

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos apresenta uma grande fração orgânica, como se observa na Tabela 1, na página a seguir.

Tabela 1 Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos gerados no Brasil, adaptado de [5]

Material	Fração(%)
Matéria Orgânica	64
Papelão e papel	13,5
Plásticos	4,7
Metais	1,5
Vidros	1,5
Outros	14,8
Total	100

3.1.2 Resíduos da produção de alimentos

Um terço dos alimentos produzidos no mundo ou 1,3 bilhões de toneladas são descartados anualmente no mundo, causando inúmeros problemas sociais e ambientais, sendo alguns desses a restrição à alimentação de milhares de pessoas e a emissão de um volume considerável de CO₂. [6]. Só no Brasil, 26,3 milhões de toneladas de alimentos (dados de 2013) são desperdiçadas, sendo a maior parte hortifrúti [7].

Em um trabalho conjunto do Sebrae-RJ e a UNEP (Programa Ambiental das Nações Unidas, sigla em inglês)[8] realizado em 2004 em restaurantes do Estado do Rio de Janeiro, constatou-se que cada restaurante produz diariamente

100,42kg de resíduos de alimentação divididos entre o apodrecimento na estocagem, preparação e restos do cliente. Assim, cada cliente produz no total 0,335 kg de resíduos.

As frações, que foram objeto daquele estudo [8], consistem nas produzidas nas etapas de armazenamento, preparação das refeições e nos restos produzidos pelos clientes. Todavia, recai na etapa de preparação a maior produção de resíduos, responsável por 80%, enquanto os clientes representam 15% e as perdas na estocagem 5% do total. [8]

3.1.3 Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos

Os resíduos orgânicos não podem ser reciclados e possuem elevado teor de umidade, o que dificulta o aproveitamento energético, não significa dizer que seja impossível fazê-lo, pois podem ser tratados. Os tratamentos dados aos resíduos orgânicos consistem na decomposição aeróbia ou compostagem, ou a decomposição anaeróbia controlada [9].

A compostagem é um processo em que organismos vivos decompõem a matéria orgânica com a presença de oxigênio. Durante o processo. O calor é gerado, e ocorre emissão de dióxido de carbono, enquanto o material sólido resultante pode ser utilizado como fertilizante [10][11]. A decomposição anaeróbia controlada gera um gás rico em metano, chamado de biogás.[12][13]. Esse método de tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos constitui uma forma de aproveitamento energético desse material, já que pode aproveitar os resíduos embora úmidos [14].

Existem casos no Brasil em que a compostagem em larga escala não foi bem-sucedida, como, a título de exemplo, a composteira da Vila Leopoldina, na cidade de São Paulo, capital paulista, que foi fechada devido aos problemasⁱ com o mau cheiro que exalava e incomodava os moradores da vizinhança, e à baixa qualidade dos fertilizantes que apresentava contaminantes[1].Contudo, mais

ⁱ A composteira se localizava no bairro da Vila Leopoldina em São Paulo – SP. Essa usina foi fechada em agosto de 2004

recentemente, o projeto Cisbraⁱ, em parceria com a empresa Visafertilⁱⁱ, tem obtido compostos de melhor qualidade[15][16].

Outra destinação utilizada para resíduos orgânicos, especificamente os alimentares, é a utilização como alimento para suínos, sendo essa uma utilização histórica, porém atualmente passa por cozimento para a esterilização[17,18]

Esse trabalho estuda uma nova alternativa de aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos, especialmente os de origem alimentar, que consiste na sua carbonização para a utilização em diversos fins.

3.2 CONSTITUINTES ORGÂNICOS DOS ALIMENTOS

Os resíduos alimentares são compostos majoritariamente por umidade, carboidratos, lipídeos e proteínas além de outros componentes, porém em menores frações mássicas.

Os componentes dos alimentos, sejam os majoritários ou minoritários, influenciam nas propriedades dos carvões obtidos a partir dos resíduos alimentares, como o fósforo, que pode prejudicar utilizações metalúrgicas.

3.2.1 Proteínas e aminoácidos

Os aminoácidos são compostos orgânicos com o grupo amina (NH_2) e o grupo ácido carboxílico. Essas moléculas são os monômeros dos peptídeos que, por sua vez, constituem os polipeptídiosⁱⁱⁱ e as proteínas. Existem diversos tipos de aminoácidos, sendo que somente vinte são proteicos. Os aminoácidos proteicos são: leucina, isoleucina, metionina, glicina, alanina, valina, prolina, fenilalanina, tirosina, triptofano, serina, treonina, cisteína, aspargina, glutamina, lisina, arginina, histidina, aspártico, glutâmico[19]. Na figura 1, é apresentada a fórmula de alguns dos aminoácidos no qual o caráter apolar ou polar da molécula pode ser evidenciado e podem apresentar radical hidrofóbico, hidrofílico ou híbrido

iCISBRA- Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico da Região do circuito das Águas

ii Visafertil – Visafertil Indústria e Comércio de Fertilizantes Orgânicos Ltda. Empresa produtora de fertilizantes orgânicos

iii Peptídeos unidos de forma específica.

Figura 1 Grupos de aminoácidos constituintes de proteínas divididos conforme a natureza química [20]

Os aminoácidos possuem carbono quiral e, portanto, podem ser dextrógiros ou levógiros. Contudo, na natureza só são encontrados aminoácidos levógiros, isso decorre do fato que as estruturas sintetizantes de peptídeos só conseguem utilizar aminoácidos levogiros [20].

Os peptídeos são os polímeros de aminoácidos e a polimerização ocorre de maneira especial. A sequência dos aminoácidos na macromolécula é ditada pelos genes, e assim, desse modo, são construídos os polipeptídios e consequentemente as proteínas.

As proteínas, assim como os carboidratos, têm suas propriedades alteradas conforme a temperatura. As proteínas sofrem o processo de desnaturação, que se trata de um processo irreversível. Esse fenômeno de desnaturação explica o embranquecimento e solidificação da clara do ovo, a qual, uma vez endurecida, não retorna ao estado original, pois a albumina se desnaturou [21].

3.2.2 Lipídeos e gorduras

Os lipídeos são um grupo diversificado de moléculas orgânicas, constituem-se de algumas vitaminas lipossolúveis, ácidos graxos e triglicerídeos, sendo os últimos dois os presentes em maior volume nos alimentos. De maneira geral, os lipídeos possuem cadeia curta se comparados aos carboidratos e aos polipeptídios, além de serem moléculas hidrofóbicas ou de caráter hidrofóbico e hidrofílico e, por isso, tem a capacidade de formar micelasⁱ. Os lipídeos também possuem diversas funções nos organismos vivos, sendo estas: a de isolamento térmico nos animais de clima frio, de proteção contra choques mecânicos e, a principal, a de reserva energética. Cada grama de lipídeo gera em torno de 9 kcal, já hidratos de carbono e peptídeos geram 4 kcal em sua queima.

Os ácidos graxos possuem um grupo ácido carboxílico e uma cauda composta de carbono e hidrogênio. O grupo ácido carboxílico é a parte polar da molécula, que é hidrofílica, e a cauda orgânica, hidrofóbica. Por possuir um ácido

ⁱ Gotícula orgânica mantida em meio inorgânico por agente químico que atua na superfície.

carboxílico na molécula ajuda a suspender substâncias hidrofóbicas em água [22].

Essas moléculas orgânicas são formadas por complexos de polipeptídios no citoplasmaⁱ das células e também por organelasⁱⁱ. Existem vários ácidos graxos, que podem ter de 4 ou mais carbonos e também podem possuir insaturações na cadeia de carbono. O ácido butílico, presente na gordura do leite, apresenta apenas 4 carbonos, enquanto o palmítico, presente em óleos vegetais, apresenta 16, e ainda há muitos outros tipos de ácidos graxos presentes em plantas e animais[21].

Quando três ácidos graxos se unem a uma molécula de glicerol, forma-se o triglicerídeo que são, de maneira geral, apolares e, portanto, hidrófobos. Os animais armazenam energia dessa forma. Quando os triglicerídeos líquidos à temperatura ambiente são considerados óleos, e quando sólidos são considerados ceras, como, por exemplo, as ceras de carnaúba e de abelha. Sendo assim, quanto mais longa for a cadeia de carbono, maior é o ponto de fusão. [22].

As gorduras ou ceras possuem diversos usos, como na saponificação, em cosméticos [22], e

mais recentemente, o biodiesel. Este é obtido por meio da transesterificação, rompendo a ligação dos ácidos graxos do glicerol e ligando a álcoois mais simples a fim de se obter moléculas orgânicas mais leves, na faixa da massa molecular do diesel [23].

3.2.3 Carboidratos e amido

O amido tem origem vegetal, composto principalmente por carboidratos e presente em vários alimentos. É uma das formas em que as plantas estocam o alimento por elas produzido através da fotossíntese. Esta, por sua vez, consiste na reação química que absorve luz, água e dióxido de carbono, tendo como

ⁱ Meio em que todas as estruturas celulares chamadas organelas estão presentes.

ⁱⁱ Estruturas responsáveis por determinada função na célula.

produtos o oxigênio e açúcares, como a glicose. A Equação 1, na página a seguir, exibe a reação de fotossíntese [24].

Equação 1 Reação global de fotossíntese.

A fotossíntese trata-se da maneira como a energia solar se fixa na biosfera na forma de hidratos de carbono. A energia dos combustíveis fósseis também provém da fotossíntese. Essa reação ocorre nos cloroplastosⁱ das plantas como em alguns tipos de cianobactérias. A seguir, o ciclo da fotossíntese e respiração representada na Figura 2.

Figura 2 Ciclo dos carboidratos [25]

O amido é encontrado em várias plantas e também em fungos, bactérias e algas. A glicose compõe os carboidratos presentes no amido como a amilose e amilopectina, esta também é encontrada em alguns protozoários. Os animais estocam polímeros de glicose na forma de glicogênio, que é um “amido animal”[24].

Os amidos encontram-se presentes na alimentação humana em cereais, tubérculos, raízes, e em algumas frutas [26]. Os cereais são uma categoria alimentar largamente utilizada, dentre os quais se destacam o trigo, o milho, e o arroz. Este último é rico em amido e representa uma fonte energética alimentar bem presente no dia a dia dos brasileiros e em várias culturas orientais. Algumas plantas têm seu amido extraído e empregado de forma isolada como a batata, o milho e a mandioca [24]. Entretanto, a utilização do amido vai além da

ⁱ Organela ou estrutura celular vegetal responsável pela fotossíntese nas plantas.

alimentação, pois os polímeros que o constituem são empregados em vários processos industriais, assim como na fabricação de materiais poliméricos sustentáveis [27][28].

3.2.3.1 Monossacarídeos

São encontrados diversos monossacarídeos nos organismos vivos. Os monossacarídeos possuem de 3 a 9 carbonos. Dentre eles a glicose, que é um monossacarídeo de 6 carbonos, e uma das principais fontes energéticas dos organismos vivos[29]. As moléculas de glicose possuem duas formas alotrópicas, uma é acíclica e a outra é cíclica. Nos amidos é observada a forma cíclica da alfa glicose. A alfa glicose e a beta glicose são duas formas da glicose que se diferenciam uma da outra pela posição do grupo OH. A alfa glicose de forma cíclica dá origem a amilose e a amilopectina. Já a beta glicose, também de forma cíclica, dá origem a celulose, macromolécula que forma a parede celular das plantas. Na Figura 3 podem-se ver as moléculas de alfa glicose e de beta glicose.

Figura 3 alotropia da glicose [25]

3.2.3.2 Polissacarídeos

Os polissacarídeos possuem diversas funções nos seres vivos; pode-se citar dentre essas funções: a constituição da parede celular das células vegetais, como também a estrutura das plantas; a formação dos exoesqueletos dos invertebrados; e reserva energética nas plantas e nos animais. Nas plantas a reserva energética na forma de carboidratos é constituída de amido, já nos animais é basicamente na forma de glicogênio. Como foi dito anteriormente, o amido compõe-se basicamente de dois polissacarídeos ou polímeros: a amilose e a amilopectina, e o monômero desses polímeros é a alfavoglicose.

A amilose é o polímero de glicose de cadeia linear. A ligação química entre os monômeros é por O-glicosídica alfa-1,4, formando cadeias lineares de 200 a 2000 monômeros de glicose [24]. A amilose tem afinidade com moléculas hidrófobas, hidrófilas e com o iodo. Esse polímero forma um complexo de cor azul com o iodo. A molécula de amilose tem geometria helicoidal, conforme Figura 4.

Figura 4 Amilose [30]

A amilopectina é um polímero de glicose de cadeia ramificada, no qual as ligações entre os monômeros são O-glicosídica alfa 1,4 e 1,6. O peso molecular da amilopectina costuma ser maior do que o da amilose e suas ramificações contêm cerca de 20 a 30 meros de alfavoglicose. A amilopectina é mais cristalina devido à geometria molecular. Uma forma de diferenciar a amilose da amilopectina é o fato de não formar complexo com o iodo. Na Figura 5, na página a seguir, é demonstrado onde ocorre a ligação molecular na amilopectina.

Figura 5 Amilopectina: ligação entre as moléculas de glicose na formação da amilopectina [30]

A relação entre amilose e amilopectina influencia nas propriedades das fontes de amido. As variedades de arroz com teor maior de amilose são mais fáceis de cozinhar que as variantes ricas em amilopectina [24]. A seguir, a tabela 2 demonstra várias fontes de carboidratos e suas respectivas frações de amido na forma de amilose.

Tabela 2 Teores típicos de amilose sobre total de amido [31][32].

Fonte de amido	Amilose (%)
Milho com alta amilose	70 a 80
Milho	25 a 28
Cereais	20 a 30
Mandioca	17
Arroz de alta amilose	25 a 33
Arroz	20 a 25
Arroz ceroso	1 a 2

3.2.3.3 Propriedades físicas

O amido a olho nu constitui-se de um pó branco, não apresenta solubilidade em água fria nem possui sabor. Conforme as condições de umidade e temperatura, os amidos passam por transformações sendo que, para que estas aconteçam, as temperaturas variam de acordo com o tipo de amido[24].

Na presença de água, os grãos de amido em baixa temperatura (abaixo de 60°C) podem absorver água em sua estrutura sem perder a forma de seus grãos, em um processo reversível. Acima dessa temperatura, também em presença de água, por volta de 65°C a 75°C, os grãos de amido perdem sua

forma, dando início aos processos de gelatinização ou gomificação. Esses processos são irreversíveis, visto que as estruturas de grãos de amido se perdem[33], como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 inchamento do amido [34]

Após a gelatinização, ao ser seco, os carboidratos do amido se arranjam de outra forma, não sendo mais a forma de grânulos. Quando o amido gelatinizado é seco ou recebe uma redução de temperatura, sofre recristalização. Esse fenômeno se dá através da retrogradação, que faz com que as cadeias de polissacarídeos tenham suas ligações O-glicosídicas rompidas, dando origem a cadeias menores. O endurecimento dos pães é causado pela retrogradação dos amidos nele presentes.

Observações feitas em micrografia eletrônica encontradas na literatura (Figura 7) mostram o fenômeno de gelatinização do amido. No caso descrito vê-se o amido de arroz não gelatinizado(A), gelatinizado(C) e ambos aquecidos a seco (B e D, respectivamente) [35].

Vale lembrar que esse processo físico, a gelatinização, se difere do ponto de transição vítrea, que é a temperatura onde os sólidos semicristalinos ou amorfos amolecem, adquirindo gradualmente viscosidades mais fluidas, mais próximas aos dos líquidos, tema esse tratado mais adiante. Os amidos possuem ponto de transição vítrea por se tratar de estruturas que não são totalmente cristalinas.

Figura 7 Amido de arroz não gelatinizado (A e B), gelatinizado (C e D), não aquecidos a seco (A e C), e aquecidos a seco (B e D) [35].

3.2.3.4 Cristalinidade do amido

Os amidos são polímeros semicristalinos e, como mencionado anteriormente, essa fração cristalina pode variar conforme o estado em que este se encontre. Quando os grãos perdem a forma, o amido passa a ser amorfo, e quando este retrograda, adquire novamente uma parte cristalina. A cristalinidade do amido é descrita pela fórmula a seguir (Equação 2).

Equação 2 Cristalinidade do amido

$$Cristalinidade_{(\%)} = 100 \times \frac{X_{amostra} - X_{amorfa}}{X_{cristalina} - X_{amorfa}}$$

X – fração em massa. [29]

A parte cristalina presente na estrutura do amido pode ser determinada por difração de raios X. Na Figura 8, pode-se observar a perda de cristalinidade do amido de arroz a 70°C.

Figura 8 Perda da cristalinidade do amido em função do aquecimento evidenciado em difração de raios X [33]

3.3 PROCESSOS DE CARBONIZAÇÃO

3.3.1 Carbonização e torrefação de biomassa

Como forma de aumentar o poder calorífico de uma determinada biomassa, esta é submetida a aquecimento sob atmosfera inerte, o qual provoca a pirólise do material sem queimá-lo por completo. Quando esse processo ocorre em temperaturas abaixo e próximas de 300°C, é chamado de torrefação ou pirólise leve. Esse tipo de tratamento já faz com que o carbono fixo do material aumente, assim como faz com que o material torrefado perca voláteis. A temperaturas superiores, até 600°C, o processo já é denominado carbonização, cujo processo elimina uma quantidade maior de voláteis, sobrando apenas quantidade residual [36][37] [38].

O carbono fixo anteriormente referido, é definido como o teor de carbono residual do aquecimento em atmosfera inerte. A seguir verifica-se a formula para calcular o carbono fixo para materiais úmidos e secos.

Equação 3 Carbono fixo de materiais úmidos (a) e secos (b) [39].

$$\text{Carbono Fixo}_{(\%) } = 100 - (\text{Umidade}_{(\%) } + \text{Material Volátil}_{(\%) } + \text{Cinzas}_{(\%) }) \quad (a)$$

$$\text{Carbono Fixo}_{(\%) } = 100 - (\text{Material Volátil}_{(\%) } + \text{Cinzas}_{(\%) }) \quad (b)$$

3.3.2 Coqueificação

Coqueificação consiste no processo de pirólise em que, a partir de carvões minerais, obtêm-se o coque. Este processo pode ser dividido em três etapas em que a primeira, durante o aquecimento do carvão e a secagem, ocorre até que a temperatura atinja 350°C.

Durante a segunda etapa, ocorrem inicialmente as reações químicas de craqueamento das moléculas orgânicas presentes no carvão. Como se refere o nome, as moléculas são quebradas em moléculas menores e, em virtude disso, a massa de carvão se torna plástica. A faixa de temperatura desse fenômeno fica entre 350°C e 500°C. Essa etapa da pirólise consiste na fase plástica quando o alcatrão é liberado.

Durante a terceira etapa, há o segundo tipo de reação que consiste na aromatização. As moléculas quebradas nas reações anteriores se juntam em moléculas maiores e de característica aromática. Após as reações, ainda na terceira etapa, as moléculas menores e remanescentes produzidas nas reações da fase plástica são eliminadas nos fumos. A faixa de temperatura da aromatização começa a partir de 500°C e vai até o final da coqueificação.

Conforme prossegue a terceira fase, o coque vai endurecendo e tornando-se mais resistente, assim como começam a se formar rachaduras no bolo de coque, o que facilita o escape de gases. Depois dos processos de pirólise, o coque é resfriado [40]. Assim como a coqueificação forma moléculas orgânicas maiores em seu endurecimento, procura-se bicom bustíveis com propriedades semelhantes ao coque.

3.3.3 Carbonização da madeira

Os carvões de madeira equivalem a uma fonte importante de energia, seja para o uso doméstico, seja para a indústria, correspondendo a 10% da matriz energética. O principal uso industrial do carvão vegetal é o siderúrgico [41][42]. No entanto, o eucalipto é a matéria-prima do carvoejamento por reflorestamento, e a espécie *E. grandis* possui cerca de 47% de umidade [43]. Enquanto a base seca desse material possui 89% de substâncias voláteis, 9,6% de carbono fixo e 0,31% de cinzas[44].

O processo de obtenção desse tipo de combustível consiste na destilação da madeira ou pirólise, esta última corresponde à separação dos componentes da madeira por meio do fogo [45]. Essa separação resulta no componente sólido, que é o carvão, e nos componentes voláteis, que podem ser condensáveis a condições ambientes (óleos e o ácido pirolenhoso) e componentes não condensáveis a condições ambientes (gás metano) [46].

O processo de pirólise do carvão é dividido em fases, assim como a coqueificação, essas fases são características da decomposição da celulose, da hemicelulose e da lignina. [47] As Faixa térmicas para a decomposição dos componentes da madeira são de: 200 a 260°C para as hemiceluloses, de 240 a 350°C para a celulose, e de 380 a 500°C para a lignina.

As faixas térmicas para as fases da carbonização da madeira são descritas por vários autores, e estão ilustradas na Figura 9.

Figura 9 Faixas térmicas da carbonização da madeira descrita por diversos autores [48-52].

[48][49][50][51][52]

A secagem consiste na etapa em que a água é eliminada, sendo assim os gases eliminados são basicamente constituídos de vapor de água. Essa é uma etapa endotérmica e ocorre a temperaturas inferiores a 200°C.

A pirólise inicia-se de forma endotérmica através da liberação de gases como CO, CO₂, metanol, metano, ácido acético e outros. A faixa térmica das reações endotérmicas é descrita com início a partir de 110°C e se desenvolve melhor entre temperaturas de 200°C e 290°C.

A partir de temperaturas por volta de 280 °C inicia se a fase exotérmica do carvoejamento, sendo liberados hidrocarbonetos, CO, CO₂ e H₂. Á

temperaturas maiores, como 500°C, os voláteis são liberados já em pequenas quantidades, predominando o H₂.

A obtenção do carvão vegetal é efetuada de diversas maneiras, uma delas são os fornos de “rabo quente”, maneira bastante rudimentar de obtenção de carvão vegetal, sendo o controle feito de maneira empírica. Esse método causa impactos sociais e ambientais perniciosos e possui baixo rendimento [53][54].

Outro modo baseia-se na obtenção por sistema de fornos como o DPC,ⁱ que possui rendimento elevado e controle eletrônico, além de aproveitar os gases da pirólise para a geração de calor para o processo [55]. Atualmente os processos de carvoejamento mais utilizados pelos fornecedores das siderúrgicas são os de fornos retangulares por causarem menos impacto social [56][57].

3.3.4Influência da queima dos materiais carbonosos no aquecimento global

A queima de combustíveis à base de carbono corresponde a uma das formas mais antigas de utilização para a produção de energia. Desde o aquecimento e do cozimento de alimentos até a produção de energia motriz para o transporte e a produção de energia elétrica. Essa forma elementar de produção energética compreende a combinação de compostos contendo carbono, hidrogênio e outros elementos, ou carbono apenas, com oxigênio atmosférico resultando em dióxido de carbono e, eventualmente, em água.

Os combustíveis carbônicos ou orgânicos provêm do processo biológico da fotossíntese, que, como sabido, ocorre nas plantas. Esse processo fixa o carbono atmosférico e a energia proveniente do Sol na biomassa vegetal. Posteriormente, os animais absorvem o carbono e a energia dos vegetais pela teia alimentar.

ⁱ Nome do processo de obtenção de carvão vegetal

Figura 10 Carbono no seu ciclo passando por diversas formas [58]

Os combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás também têm origem em seres fotossintetizadores (mesmo que indiretamente). O carbono e a energia do Sol acumulados ficaram soterrados por milhões de anos entre as rochas. Ao serem extraídos e queimados, os combustíveis liberam o carbono armazenado. Na Figura 10 observa-se as rotas do elemento carbono em seu ciclo. Dentre os combustíveis carbonosos sólidos, o carvão é o que demanda mais tempo para completar o ciclo [59].

Devido ao lento ciclo dos combustíveis fósseis, quando usados pelo homem, o carbono fica acumulado na atmosfera na forma de dióxido de carbono, pois há um desequilíbrio entre a formação e o consumo desses depósitos fósseis. O dióxido de carbono, assim como o vapor de água, tem a propriedade de acumular calor na atmosfera, impedindo que as ondas de calor sejam propagadas ao espaço e que a terra fique muito fria. Esse efeito é chamado de efeito estufa [60].

Figura 11 Efeito Estufa [61]

Entretanto, o aumento da concentração de dióxido de carbono acarreta o desequilíbrio no fluxo de calor, aumentando o efeito estufa, dando origem ao aquecimento global[62].

Os carvões, conforme o tipo, apresentam relevância maior ou menor na emissão de gases estufa, e consequente contribuição para o aquecimento global. Os carvões coqueificáveis são um tipo de carvão mineral, e como já falado anteriormente, contribui para o aquecimento global. Os carvões de desmatamento também contribuem para o aquecimento global, pois reduz a quantidade de carbono absorvido nas florestas.

Tabela 3 Propriedades ambientais dos materiais carbônicos. *Considera se apenas a emissão de sua origem propriamente dita e na forma de CO₂. Não se considera as emissões indiretas como a proveniente de seus insumos e a do seu transporte. **No caso dos resíduos orgânicos alimentares as grandes áreas já foram utilizadas na produção de alimentos e não necessita dedicar novas áreas para fins energéticos.

Tipo de carvão	Carbono neutro?*	Utiliza grandes e novas áreas?
Fóssil	Não	Não
Vegetal de desmatamento	Não	Sim
Vegetal de Reflorestamento	Sim	Sim
De resíduos alimentares	Sim	Não**

Podemos verificar que os carvões de resíduos alimentares possuem vantagens ambientais em relação aos seus similares, pois não retira carbono do solo para a atmosfera e não necessita substituir áreas de produção de alimento para plantações com fins energéticos.

3.3.5 Carbonização do lixo orgânico

No estudo realizado por Lohri e colaboradores [63], analisou-se a obtenção de carvão a partir de lixo orgânico para utilização como combustível de cozimento, tendo sido observados diversos tipos de matéria orgânica separadamente. Uma das análises abordou as propriedades químicas e econômicas dos resíduos, com ênfase nas propriedades químicas, principalmente o carbono fixo.

Os resíduos analisados foram algas marinhas (plantas aquáticas), cascas de batata, coco, papelão, restos de podas e jardinagem, e serragem. A Tabela 4 mostra os valores de porcentagem de carbono fixo destes materiais.

Tabela 4 Carbono fixo de alguns tipos resíduos sólidos orgânicos. Adaptado [63]

Material orgânico	Carbono fixo (%)
Bagaço de cana	16,3
Cascas de batata	9,1
Coco	18,8
Poda e jardinagem	19,2
Papelão	12,3
Serragem	20,7
Algas	0

Os restos de poda e jardinagem, assim como o bagaço de cana, a serragem e o coco, apresentaram maiores teores de carbono fixo dentre as biomassas analisadas nos experimentos realizados pelos autores [63].

3.3.6 Carbonização do amido

A carbonização do amido é realizada para inúmeros fins. Alguns estudos objetivam obter esferas porosas de carbono a partir de amido de milho [64].

Outros estudos carbonizaram amido de batata em baixa temperatura em óleo sintético [65] e, por extensão, a síntese catalítica de nano fibras de carbono a partir da amilose e carboidratos de arroz também foi estudada. [66]

Durante o aquecimento do amido, este sofre diversas transformações físico-químicas, nas quais ocorre a quebra de algumas ligações químicas, a formação de outras, como também a liberação de voláteis. Geralmente a decomposição térmica do amido é efetuada em atmosfera inerte, mas há um estudo em que se observou a ocorrência com a presença de oxigênio [67].

Experimentos realizados com a decomposição de amido de milho com alto teor de amilose (80%) (Figura 12), e sob aquecimento de 10°C/minuto, mostraram dois estágios na decomposição do amido quando em atmosfera inerte, e quando em atmosfera oxidante, foram observados três estágios. Os primeiros dois estágios são observados tanto em atmosfera inerte quanto em atmosfera oxidante, que ocorre sob temperaturas de até 150°C no primeiro estágio, e de 250°C a 325°C no segundo estágio. O terceiro estágio da decomposição acontece somente em atmosfera oxidante (o ar atmosférico, por exemplo) sendo finalizado à temperatura de 530°C. O último estágio libera gases simples como monóxido e dióxido de carbono e água, e é chamado de combustão incandescente.

As fases da decomposição térmica do amido estudado podem ser observadas na Figura 12. O amido em estudo foi previamente seco em estufa por 24 horas à 110°C.

Figura 12 Perda de massa do amido de milho com 80% de amilose em função do tempo a uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto [67].

Os voláteis liberados tiveram composições que variavam conforme a fase. Na primeira etapa, há predomínio da água, na segunda etapa ocorre a liberação de compostos orgânicos, e na terceira fase, óxidos de carbono [67].

Outra importante propriedade do amido para a obtenção de compostos carbonáceos é a temperatura de transição vítrea, que é análoga ao ponto de fusão em materiais com estrutura cristalina, porém a diminuição da viscosidade ocorre de maneira gradual com o aumento de temperatura, conforme citado anteriormente. Essa propriedade física tem um papel semelhante à fase plástica do coque, porém a temperaturas bem inferiores.

As variedades de arroz são muito presentes nas mesas dos brasileiros e consequentemente nos resíduos alimentares. Abaixo temos a tabela que mostra a temperatura de transição vítrea de variedades de arroz nas formas de farinha e amido [68].

Tabela 5 Temperatura de transição vítrea de amidos de arroz. Por ser o amido um polímero e não ser totalmente cristalino, a temperatura de transição vítrea é mais relevante que o ponto de fusão[68].

Temperatura de transição vítrea amidos de variedades de arroz (em °C)		
	Forma	
	Amido	Farinha
Indica	235,8	221,8
Japônica	215,5	210,9
Japônica ceroso	237,6	209,3

Em estudos realizados com a carbonização de amido de milho em baixas temperaturas, (entre 200°C e 215°C) em atmosfera inerte, foi avaliada a obtenção de partículas de carbono a 205°C. As amostras foram carbonizadas durante 3, 6, 9 e 12 horas e os autores verificaram a diminuição da proporção de oxigênio e hidrogênio em relação ao carbono, devido à perda das moléculas de água. Observou-se também a perda da fase cristalina do amido de milho graças ao aumento da fase amorfa do carbono. Esse estudo também efetuou a carbonização a 600°C por 1 hora em amostras previamente torrefadas (200°C e 215°C) [69].

As micrografias da Figura 14 mostram a microestrutura resultante do tratamento térmico aplicado nesse estudo.

Figura 13 Amostras de amido de milho torrefadas por 9 horas a temperaturas (sob nitrogênio) de 200°C (a e e), 205 (b e f) , 210 (c e g) e 215 (d e h) As amostras da coluna da direita (e,f,g e h) também foram tratadas á 600°C por 1 hora [69].

3.3.7 Carbonização dos resíduos alimentares

É o aquecimento dos resíduos orgânicos alimentares na ausência de oxigênio com o intuito de eliminar os voláteis. É estimado que a faixa de temperatura para a carbonização seja similar ao dos amidos, que é por volta de 200°C a 600°C [69]. Outras matérias orgânicas podem ser carbonizadas, porém restos de comida compostos por frutas e verduras apresentam muita água, sendo necessária a secagem prévia a 120°C por 48 horas. Após a secagem, pode-se efetuar a carbonização.

3.4 MOAGEM

Os componentes podem ser moídos antes ou após a secagem em estufa. Se for antes, somente podem ser moídos por extrusão. Após a secagem, os componentes podem ser moídos por extrusão ou por moinho de bolas ou por pistilo e almofariz. Se o material moído resultar em um pó, essa mistura pode ser classificada. Entretanto, se o resultado for uma pasta, não é possível classificar, sendo mais indicada a moagem por extrusão.

3.4.1 Moagem manual

A moagem manual consiste no processo em que o material é moído manualmente com pistilo e almofariz de laboratório, quando é pressionado e friccionado entre o pistilo e o almofariz.

3.4.2 Moagem em moinho de bolas

Esta moagem consiste no processo em que o material é moído em moinho de bolas em vaso de cerâmica com esferoides de diversos tamanhos. As esferas moem por amassamento e por fricção. O vaso rola sobre dois cilindros motrizes em baixa velocidade angular. A seguir temos o croqui do moinho de bolas (Figura 15).

Figura 14 Representação esquemática em corte do moinho de bolas, O autor

3.4.3 Moagem por extrusão

A moagem por extrusão consiste em colocar o material a ser moído em um moinho que possui uma rosca que comprime o material contra uma grade com pequenos orifícios, onde o material é extrudado. Esse tipo de moagem é mais adequado a materiais pegajosos.

Figura 15 Representação esquemática em corte do moinho de extrusão ou de carne. O autor

3.4.4 Moagem por moinho de café

A moagem através do moinho de café pode ser realizada com materiais duros, este tipo de moinho faz com que o material seja quebrado em partículas menores. Esse processo ocorre por fricção e cisalhamento (Figura 17).

Figura 16 Representação esquemática em corte do moinho de café. O autor.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 OBTENÇÃO DE LIXO ORGÂNICO ALIMENTAR

A obtenção de lixo orgânico alimentar consistiu no recolhimento de restos alimentares de restaurantes que podem ter as seguintes origens: as sobras da preparação e os restos de alimentos preparados, sendo estes últimos os restos dos clientes ou das gôndolas.

As amostras de resíduos orgânicos foram colhidas dos restos das bandejas do restaurante *self-service* da Faculdade de Engenharia Mecânica da USP em dias diferentes e foram chamadas de “a”, “b”, “c”, “d” e “e” (em letras minúsculas). Na Tabela 6, têm-se as amostras de resíduos orgânicos colhidos e os procedimentos efetuados.

Tabela 6 As amostras de resíduos orgânicos colhidos e os experimentos realizados relativos a cada uma das amostras

Amostra	Procedimentos realizados
a	Teste de secagem, separação
b	Secagem, moagem e carbonização piloto
c	Secagem, moagem e carbonização
d	Separação de componentes
e	Secagem, moagem, carbonização e caracterização

As amostras receberam diferentes tratamentos pois tratava-se de procedimentos piloto para determinar a melhor rota de tratamento.

4.2 COMPONENTES ALIMENTARES DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS ESTUDADOS

Para estudar as características dos resíduos sólidos alimentares coletados a serem empregados na obtenção do carvão, foi separado os alimentos presentes nas amostras, medindo a respectiva massa de cada fração, e na literatura, verifica-se as propriedades nutricionais de maior interesse para a carbonização, como, por exemplo, a quantidade de carboidratos, lipídeos, valor energético e umidade.

Conhecidas essas propriedades e a fração de cada alimento na amostra, calcula-se o valor médio de cada propriedade da amostra pela média ponderada da fração de cada componente (batata, arroz etc.).

4.3 OBTENÇÃO DE LIXO ORGÂNICO ALIMENTAR SINTÉTICO

Como os resíduos orgânicos possuem composição variável, difícil de controlar, decidiu-se preparar resíduos sintéticos. Os componentes a serem usados na amostra artificial consistem de alface, arroz tipo 1 cozido, batata-inglesa frita, feijão carioca cozido e frango grelhado.

As proporções a serem utilizadas na amostra sintética foram baseadas nas amostras coletadas e na literatura [70].

Nos experimentos preliminares com a primeira amostra de resíduos coletados, basicamente composta por arroz e batata frita, foi encontrada 1.069g de massa úmida de arroz e 212 g de batata frita, sendo a proporção entre arroz e batata aproximadamente de 5:1. Para uma amostra de 2kg, tem-se que as quantidades de arroz e de batata frita são 1.296g e 260g respectivamente, além de outros componentes.

A quantidade de feijão encontrado em resíduos relatado pela literatura [70] era de 87g em um total de 611g de amostra total, resultando em 284g para cada 2.000g de amostra, ou 14% em massa.

A quantidade de verduras encontrada em experimentos anteriores foi de 91g para 1.768g de amostra, dando aproximadamente 5% da massa. Isto é aproximadamente 100g para uma amostra de 2kg. A verdura a ser usada é a alface cresa.

Como fonte de proteína animal é utilizada carne de frango grelhada, mais precisamente carne de peito de frango sem pele. A quantidade encontrada em experimentos anteriores foi de 56g para 1.768g de amostra, resultando em 3,2% em massa. Para uma amostra de 2kg, é necessário 64g do produto.

Tabela 7 Composição proposta para o resíduo orgânico alimentar sintético de acordo com amostras do próprio autor (Tabela 9) e de outros [70]

Batata-inglesa frita (g)	260
Arroz tipo 1 cozido (g)	1296
Feijão preto cozido (g)	280
Frango grelhado peito (g)	64
Alface crespa (g)	100
Total (g)	2000

4.3.1 Preparo dos componentes da mistura

Os componentes alimentares do resíduo orgânico sintético foram preparados de acordo com a TACO [71]. Os componentes que necessitam elaboração são o arroz, o feijão, a batata e o frango. A alface não necessita de preparos complexos, sendo necessárias apenas a lavagem e a secagem. Os ingredientes dos resíduos sintéticos foram preparados sem a adição de sal ou qualquer tipo de tempero.

Para preparar o arroz, utiliza-se o seguinte método de preparação:

- a. Pesar o arroz tipo 1.
- b. Retirar as sujidades do arroz tipo I. Lavar bem os grãos.
- c. Não adicionar nenhum ingrediente ao alimento.
- d. Para cada quilograma de arroz tipo 1, medir 2 litros de água.
- e. Colocar a água para ferver e acrescentar o arroz tipo I.
- f. Cozinhar em fogo médio, por aproximadamente 40 minutos. Acrescentar água se necessário, até que os grãos estejam cozidos.

Para o preparo da batata frita, utiliza-se o modo de preparo descrito a seguir:

- a. Pesar 1 kg de batata.
- b. Lavar bem. Descascar e cortar em palitos. Manter as batatas cortadas em água fria até o momento da fritura.
- c. Não adicionar nenhum ingrediente ao alimento.
- d. Enxugar as batatas antes da fritura.

e. Aquecer 500mL de óleo em uma panela de 30 centímetros em fogo médio. Colocar 1kg de batatas na panela por cerca de 20 minutos, mexendo vagarosamente até ficarem douradas.

f. Retirar e colocar em papel absorvente.

g. Deixar esfriar.

Para o feijão carioca tipo 1, tem-se o seguinte método de preparação:

a. Pesar o feijão.

b. Retirar as sujidades do feijão. Lavar bem os grãos.

c. Colocar o feijão em 2 litros de água fria para cada quilograma e deixar de molho por 12 horas.

d. Descartar a água.

e. Colocar o feijão para cozinhar em 1 litro de água para cada quilograma.

f. Cozinhar 1kg de feijão em panela destampada por aproximadamente 2 horas em fogo baixo ou até que o grão esteja macio, mas sem romper a casca. Se a quantidade de feijão for de 3kg, cozinhar em fogo médio.

g. Deixar esfriar.

Para o frango grelhado, tem-se o seguinte método:

a. Lavar o peito de frango, escorrer, e retirar a pele se for o caso.

b. Aquecer a grelha.

c. Colocar o peito, deixando grelhar bem um lado (aproximadamente 20 minutos) e virar somente uma vez (aproximadamente 20 minutos). Quando o peito estiver dourado, estará pronto (tempo total aproximado 45 minutos).

d. Retirar e deixar esfriar.

4.3.2 Mistura dos componentes

Após preparados, os componentes são pesados e misturados de acordo com a Tabela 7 e moídos em um moedor de carne para melhorar a homogeneização.

4.4 MOAGEM

Os resíduos coletados passaram por apenas pela moagem por moinho de bolas, como do diagrama abaixo

Figura 17 Sequência de moagem dos resíduos coletados

Já os resíduos preparados passaram pela moagem por extrusão antes da moagem, e após a secagem, também passou por dois tipos de moagem: por moinho de bolas e por moinho de café, como mostrado no diagrama abaixo.

Figura 18 Sequência de moagem dos resíduos preparados

O carvão utilizado para obter os carvões recarbonizados, passaram pela moagem de alta energia em moinho vibratório.

4.5. CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A classificação granulométrica foi feita medindo a massa dos retidos e as massas dos passantes em cada faixa granulométrica [72]. As peneiras selecionadas tinham a abertura de malha de 1mm, 0,3mm e 0,150mm.

4.6 BRIQUETAGEM

A briquetagem refere-se ao processo em que misturas são agregadas por compactação. O material foi briquetado através da pressão exercida pela força de prensas hidráulicas aplicadas em matriz de aço cilíndrica de 10 e 25mm de diâmetro. A força aplicada variou de 50 a 70kN.

4.7 OBTENÇÃO DE CARVÕES DE RESÍDUOS ORGÂNICOS ALIMENTARES

Abaixo temos o diagrama dos processos de obtenção dos materiais carbonosos derivados dos resíduos alimentares

Figura 19 Sequência dos processos de torrefação e carbonização dos resíduos coletados.

Figura 20 Sequência dos processos de torrefação e carbonização dos resíduos preparados ou sintéticos

4.7.1 Torrefação e carbonização dos resíduos alimentares coletados

Para avaliar a temperatura e tempo de carbonização dos resíduos orgânicos, iniciou-se os experimentos de carbonização à temperaturas baixas, por volta de 210°C por tempos de 12 horas [69]. Porém esses valores de tempo e temperatura variaram em relação a literatura [69] em decorrência de que os amidos presentes nos resíduos orgânicos são predominantemente de origens diferentes do milho, sendo as fontes mais comuns o arroz, o feijão, e a batata.

As amostras de resíduos alimentares coletados denominados “b” “c” e “e” foram carbonizadas. Na amostra “b”, a carbonização foi uma experiência piloto para estudar a possibilidade de carbonização da amostra. Na amostra “c” a carbonização foi feita como maneira de estudar a temperatura e o tempo necessários para o processo. Finalmente, na amostra “e” elaborou-se um estudo mais detalhado.

O carvão da amostra “b” foi obtido pelo aquecimento à 210°C por 50 horas de um pedaço da pasta dessa amostra, moldada em formato de pequenas esferas e aquecidas em cadinho coberto por papel alumínio para criar um ambiente pobre de oxigênio em volta da amostra.

Da amostra “c” foram feitos carvões em forma de esferoides assim como no experimento com a amostra “b”. Dessa maneira foram feitas amostras de 5 gramas. A finalidade dessa carbonização foi obter o tempo e a temperatura ideais para a carbonização à baixa temperatura (ou torrefação). Na Tabela 11, página 45, veem-se o tempo e a temperatura de carbonizações testadas e a respectiva perda de massa.

Da amostra “e” foram carbonizados briquetes de aproximadamente 15 gramas sendo que essas amostras receberam quatro tratamentos térmicos diferentes, conforme Tabela 8. Esses tempos e temperaturas foram escolhidos baseados em resultados práticos e na literatura [69]

Tabela 8 tratamentos térmicos das amostras do tipo “e”

Tipo de amostra	Tratamento
e-1^a	2h à 350°C e 17h à 300°C
e-1b	2h à 350°C e 17h à 300°C e 1h à 600°C
e-2^a	17h à 300°C
e-2b	17h à 300 e 1h à 600°C

Devido as peculiaridades dos resíduos orgânicos, o tempo e temperatura adequados para a torrefação e carbonização foram ajustados experimentalmente. Assim os tempos de carbonização à baixas temperaturas (abaixo de 350°C) escolhidos variaram de 17 até 50 horas. Espera-se que os carvões torrefados à temperaturas por volta de 200 a 250°C possuam melhor resistência mecânica que carvões torrefados à temperaturas por volta de 300 a 350°C por ter saída de gases mais lenta conferindo maior compactação

4.7.2 Torrefação e Carbonização dos resíduos alimentares sintéticos

As amostras de resíduos alimentares sintéticos foram aquecidas em temperatura ambiente de 20°C até 300°C em cerca de 90 minutos, sendo assim a taxa média de aquecimento de aproximadamente 3,1(°C/minuto), e nessa temperatura permanecendo por 18 horas. O aquecimento de 300°C até 590°C foi realizado em 100 minutos, sendo assim a taxa média de aquecimento de 2,9(°C/minuto) e permanecendo nessa temperatura por 1 hora.

O tempo e as temperaturas foram escolhidos com base na carbonização e a torrefação das amostras “e” de resíduos orgânicos coletados. A proteção contra o oxigênio do ar foi feita enrolando as amostras em papel alumínio. Da mesma maneira que as amostras do tipo “e” de resíduos orgânicos alimentares coletados.

Algumas amostras foram tratadas por temperatura mais baixa e tempo prolongado: por 45 horas a 230°C.

4.7.3 Recarbonização

Com o intuito de obter carvões mais compactos e com maior teor de carbono fixo, efetuou-se a mistura de resíduos alimentares sintéticos secos com carvão de resíduos orgânicos sintéticos carbonizados a 600°C. O ciclo térmico aplicado a mistura de resíduos preparados secos e carvão, foi o de torrefação por 18h a 300°C seguida pela carbonização á 600°C por 1h, como na Figura 20.

4.8 ANÁLISE DE VOLÁTEIS E ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

A análise de voláteis foi feita aquecendo a amostra da temperatura ambiente até a temperatura de 920°C, em atmosfera inerte composta de gás nitrogênio, e permanecendo na temperatura máxima por 20 minutos [73]. O teor de cinzas dos materiais carbonáceos foi obtido aquecendo a amostra em atmosfera oxidante a temperaturas superiores a 900°C e por tempo de pelo menos 20 horas[74]. O teor de carbono fixo é obtido pela diferença entre o teor de cinzas e do material obtido após a eliminação de voláteis. A análise imediata relata os teores de cinzas, carbono fixo e de voláteis de uma amostra.

4.9 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

As amostras de cinzas foram aquecidas à 1.020°C por duas horas para determinar a perda ao fogo, depois foram prensadas para a análise dos teores de elementos químicos. Para a obtenção destes teores nas amostras de cinzas, usou-se a fluorescência de raios X. A calibração é a de STD-1 (Standardless), relativa à análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio na tabela periódica. O equipamento utilizado foi o modelo S8 Tiger da marca Bruker.

4.10 TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BRIQUETES

Para testar a resistência mecânica dos briquetes, mede a máxima resistência mecânica obtida no teste dividido pela área da base do briquete. O formato dos briquetes de resíduos orgânicos utilizados são aproximadamente cilíndricos e para efeitos de cálculo, utiliza-se o diâmetro médio de cada briquete, tomando três medidas do diâmetro do briquete. Também é comum nesse tipo de briquete que as pontas se apresentem arredondadas, sendo importante lixar até obter duas superfícies planas e paralelas.

Em alguns experimentos não foi possível obter grande número de corpos de prova em qualidade para fazer testes de resistência, sendo assim os valores de resistência mecânica um indicativo, do valor da resistência do material

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS COLHIDOS

5.1.1 Caracterização

A amostra “d” foi separada quanto aos seus componentes, assim como a partir desses pode-se calcular as propriedades da amostra “d”.

A Tabela 9 mostra os componentes da amostra “d” e suas propriedades importantes. Os dados nutricionais foram obtidos de [71]

Tabela 9 Tipos de alimentos presentes na amostra “d” e as propriedades calculadas [71]

Composição da amostra lixo orgânico coletado úmido			
Componente Alimentar	quantidade (g)	Propriedades relativas	(%)
Arroz integral cozido	854,2	Umidade	65,99
Bolinho de arroz	197,7	Carboidratos	25,05
Batata frita	273,3	Lipídeos	3,86
Batata cozida	294,2	Proteínas	4,23
Couve na manteiga	91,91	Outros	0,87
Frango frito	56,38		

Propriedades teóricas da amostra		Densidade energética teórica (MJ/kg)	
massa total (g)	1768	Base úmida	6,27
umidade (g)	1166	Base seca	18,45
massa seca teórica (g)	601		
Energia acumulada teórica (kJ)	11092		

A formula para o cálculo das propriedades relativas está descrita abaixo:

Equação 4 formula para o cálculo das propriedades alimentares relativas dos resíduos alimentares

$$\begin{pmatrix} \%umidade \\ \%carboidratos \\ \%lipídeos \\ \%proteínas \\ \%outros \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n x_{alimento i} \cdot \begin{pmatrix} \%umidade alimento i \\ \%carboidratos alimento i \\ \%lipídeos alimento i \\ \%proteínas alimento i \\ \%outros alimento i \end{pmatrix}$$

Já para a densidade energética, temos descrita na formula abaixo:

Equação 5 Formula do Cálculo da energia específica dos resíduos alimentares

$$Energia Específica = \frac{\sum_{i=1}^n M_{alimento i} \cdot Energia_{Alimento i}}{\sum_{i=1}^n M_{alimento i}}$$

5.1.2 Secagem dos resíduos

Para carbonizar o resíduo, é necessário primeiramente secar a amostra para a eliminação de água a fim de viabilizar a maior compactação da amostra. Na Tabela 10, na página a seguir, vê-se a perda de massa de três amostras (a, b e c) durante a secagem.

Tabela 10 Perda de massa durante a secagem por 120°C e 72h.

Amostra	Massa a verde (g)	Massa seca(g)	Perda (%)	Remanescente(%)
a	1.282,4	486,3	62,1	37,9
b	2.100	400	81	19
c	4.515	1.370	69,7	30,3

5.1.3 Moagem

Nenhuma das amostras apresentou aspecto pastoso ou pegajoso após a secagem. As amostras “b”, “c” e “e” foram moídas em moinho de bolas. As amostras “b” e “c” apresentaram aspecto pastoso após a moagem. Enquanto a amostra “e” virou uma espécie de pó. Em seguida, a amostra “b” após a moagem (Figura 18).

Figura 21 Aspecto da amostra “b” após moagem. O autor.

Observa-se que a moagem para as amostras “b” e “c” em moinho de bolas revelou-se inadequada, pois, durante o processo, o material se tornou pegajoso e os esferóides grudaram junto com o material nas paredes do moinho, sendo necessária sua retirada manual.

É sugerido que o aspecto pegajoso das amostras b e c seja causado pela maior quantidade de óleo nessa mistura alimentar, pois a secagem elimina a

água, deixando os óleos provenientes dos alimentos provocar a adesão das partículas.

5.1.4 Carbonização dos resíduos colhidos

Para a amostra de resíduo coletados do lote “b” o resultado foi um carvão esferoide de aparência firme.

Para a amostra de resíduos do lote “c” Pode-se observar que, nas primeiras horas de tratamento, não há perda de massa, ou esta é muito pequena, mas após 50 horas de tratamento acontece expressiva perda de massa, indicando que pode ser possível a carbonização à baixa temperatura desde que os tempos de tratamento sejam elevados.

Tabela 11 Perda de massa durante a carbonização da amostra “c”

Amostras de resíduos alimentares a 210°C da amostra “c”						
Tempo (horas)		Massa das amostras em gramas				
		1	2	3	4	5
18	A verde	3,01	3,08	2,98	2,96	3,02
	Após 18h	3,01	3,08	2,98	2,96	3,02
	variação de massa (%)	0	0	0	0	0
24	A verde	3,07	3,09	2,93	3,59	3,03
	Após 24h	2,99	2,99	2,67	3,34	2,98
	variação de massa (%)	2,6	3,2	8,9	7,0	1,7
30	A verde	3,01	3,43	3,08	3,01	2,98
	Após 30h	2,89	2,93	2,63	2,59	2,41
	variação de massa (%)	4,0	14,6	14,6	14,0	19,1
50	A verde	3,01	3,08	2,98		
	Após 50h	1,74	1,79	1,69		
	variação de massa (%)	42,2	41,9	43,3		

Para a amostra “e” observam-se as perdas de massa da base previamente seca das amostras nas tabelas Tabela 12 e Tabela 13 a seguir.

Tabela 12 Perda de massa durante a carbonização da amostra “e” com os tratamentos e-1a e e-1b. a comparação com o carvoejamento do eucalipto é descrito na mais adiante na Tabela 39 que se encontra página 76.

	Inicial	e-1a	e-1b
Média	15,12	8,28	4,39
N	10	2	5
Desvio Padrão (g)	0,4717	0,0636	0,3400
remanescente (%)		54,74	29,03
perda em (%)		45,26	70,97
Desvio Padrão (%)		1,76	2,42

Tabela 13 Perda de massa durante a carbonização da amostra “e” com os tratamentos e-2a e e-2b.

	inicial	e-2a	e-2b
Média	14,96	8,72	4,60
N	10	2	7
Desvio Padrão (g)	0,1776	0,3960	0,1984
remanescente(%)		58,29	30,72
perda em (%)		41,71	69,28
Desvio Padrão(%)		2,74	1,38

Tanto as amostras torrefadas (tratamento tipos e-1a e e-2a) quanto as amostras carbonizadas (tratamento e-1b e e-2b) apresentaram certa diferença de massa remanescente nas amostras. Entretanto, essa redução é mais pronunciada em relação às amostras torrefadas (temperatura de tratamento térmico entre 300°C e 350°C). As amostras que foram previamente aquecidas à 350°C tiveram perda de massa maior que aquelas que não passaram por esse tratamento prévio. Estes resultados mostram que o aumento de temperatura de 210°C (amostra “c”) para a faixa entre 300°C e 350°C (amostra “e” ensaios e-1a e e-1b) leva a obtenção da perda de massa típica para tempos de 50 horas em cerca de apenas 17 horas. Elevando-se a temperatura para 600°C por apenas 1 hora obtém-se uma perda de massa adicional bastante significativa (Tabela 12 e Tabela 13).

5.1.5 Caracterização dos resíduos colhidos

5.1.5.1 Análise por microscopia eletrônica

Após a carbonização, alguns desses briquetes foram observados no MEV. As amostras analisadas apresentaram dois tipos de estruturas dominantes (Figura 22a e Figura 22b). Aparentemente, uma das estruturas é derivada do amido presente nos restos alimentares [69] (Figura 22a). O amido dos resíduos, antes da carbonização, passa por um processo de gelatinização e perde sua forma granular (Figura 6), assim como o aquecimento (acima de 215°C para os amidos de milho) pode provocar a formação de estruturas repuxadas (Figura 13d e Figura 13h). A estrutura apresentada na Figura 22b aparentemente é derivada de fibra vegetal.

Figura 22 Imagens de elétrons secundários em dois pontos da amostra, torrefada a 300°C e carbonizada a 600°C por 1 hora (e-2b).

Além disso, realizou-se a análise por EDS em dois pontos da mesma amostra, identificados na Figura 23.

Figura 23 Imagens de áreas analisadas por EDS de uma amostra e-2b.

As Figura 24 e Figura 25 exibem os resultados do EDS. Nota-se que, na fase carbonizada, não há presença significativa de outros elementos além do carbono, visto que o hidrogênio não é detectado neste tipo de análise. Os cristais claros presentes na estrutura são cristais de cloreto de sódio provenientes do tempero dos alimentos, que tem sua concentração aumentada no produto final se comparados à antes da carbonização.

Figura 24 Análise por EDS da área clara da Figura 23

Figura 25 Análise por EDS da área escura da Figura 23

A composição química das duas fases mostradas no EDS é apresentada na Tabela 14. Vale lembrar que a precisão da composição química mostrada na tabela a seguir é limitada, pois o EDS não é indicado para a análise de elementos leves como o carbono. Porém, é possível verificar que as áreas analisadas podem ter composições variáveis e sobre prováveis componentes dos resíduos alimentares como sais usados para tempero.

Tabela 14 Elementos encontrados por microanálise química por EDS da área clara e área escura da amostra e-2b

Area clara		Area escura	
Elemento		Elemento	
C	✓	C	✓
O	✓	O	✓
Na	✓	Na	✓
Mo		Mo	✓
P		P	✓
Cl	✓	Cl	✓
K	✓	K	✓

5.1.5.2Análise imediata

Os resultados na Tabela 15 mostram os teores de voláteis, carbono fixo e cinzas de amostras e-1a e e-1b de carvões dos restos alimentares previamente secos em estufa e carbonizados.

Tabela 15 Composição obtida pela análise imediata

	voláteis (%)	Carbono fixo (%)	cinzas(%)
e-1a (T_{max}=350°C)	67,0	30,2	2,8
e-1b (T_{max}=600°C)	9,4	82,8	7,8

Pode-se observar teores consideráveis de não voláteis nas amostras tratadas a temperaturas mais elevadas. As madeiras provenientes de eucaliptos possuem teores de voláteis entre 74% a 89% [43]. Para calcular o teor total de voláteis do resíduo (amostra “e”), deve-se levar em conta os resultados apresentados nas Tabelas Tabela 9 e Tabela 12, obtendo-se os valores de 73,7% para amostra e-1b e 82% para a amostra e-1a portanto, em teores comparáveis com aqueles da madeira de eucalipto.

A diferença entre os valores obtidos nos procedimentos e-1a e e-1b devem estar relacionados aos diferentes caminhos seguidos pelos tratamentos de carbonização.

5.1.5.3 Teste de resistência mecânica

Para avaliar os possíveis usos dos carvões de resíduos orgânicos, inclusive em processos metalúrgicos, é necessário avaliar propriedades como a resistência à compressão. Briquetes de material carbonizado e-1a e e-1b foram submetidos a ensaio de compressão na direção axial com velocidade de deslocamento de 20 mm por minuto. Os briquetes tinham diâmetro e altura em torno de 22 mm. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos, onde se percebe uma tendência de diminuição da resistência à compressão com o aumento da temperatura e do tempo de carbonização, isto é, com a diminuição de matéria volátil do material. Isto pode estar associado ao aquecimento suplementar o qual provoca uma perda de massa e, portanto, uma diminuição de densidade e um aumento da porosidade. Tais variações são devidas à eliminação de voláteis, com consequente perda de resistência à compressão.

Tabela 16 Teste de resistência mecânica de amostras (e-1a e e-1b)

Corpos de prova n°	Resistência à compressão (MPa) das amostras tipo:	
	e-1a ($T_{\max}=350^{\circ}\text{C}$)	e-1b ($T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$)
1	1,805	1,36
2	1,641	1,282
média	1,723	1,321

5.2 RESÍDUOS ORGÂNICOS SINTÉTICOS

5.2.1 Preparo

O arroz, o feijão, a batata frita e o frango foram preparados segundo os métodos propostos em 4.2.2.1. A batata foi frita com temperatura acima de 200°C . A alface não foi preparada, tendo sido utilizada apenas *in natura*.

A mistura, ou seja, o resíduo orgânico alimentar sintético, foi preparada com a composição descrita na Tabela 17.

Tabela 17 Massa da mistura de restos alimentares

batata-inglesa frita (g)	200 (+/-5)
arroz tipo 1 cozido (g)	1.295 (+/-5)
feijão preto cozido (g)	285 (+/-5)
frango grelhado peito (g)	80 (+/-5)
alface crespa (g)	100 (+/-5)
total (g)	1.960 (+/-5)

5.2.2 Características

A partir da composição desse resíduo, é possível calcular as propriedades dessa amostra com base nas Equação 4 e Equação 5 e em dados da literatura [71].

Tabela 18 conteúdo da amostra de resíduo orgânico alimentar sintético.

Quantidade presente no total da amostra úmida						Deletérios	
Umidade	Energia	Proteínas	Gorduras	Carboidratos	Cinzas	Sódio	Fósforo
(g)	(kJ)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1359	10800	82,1	32,42	476,7	10,04	0,06265	0,8599
Quantidade relativa							
Umidade	Energia	Proteínas	Gorduras	Carboidratos	Cinzas	Sódio	Fósforo
(%)	(MJ/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
69,32	5,511	4,189	1,654	24,32	0,512	0,003196	0,04387

5.2.3 Processamento dos resíduos sintéticos

5.2.3.1 Secagem dos resíduos

Para carbonizar o resíduo foi necessário primeiramente secar a amostra para a eliminação de água com o objetivo de obter maior compactação do material carbonáceo resultante, assim como nos resíduos reais. A seguir, a Tabela 19 trata da redução de massa da amostra de resíduos sintéticos (ou a mistura) e das amostras separadas (alface, arroz, batata frita, feijão e frango).

Tabela 19 Redução de massa das amostras observadas pela massa remanescente após a secagem (a diferença de massa em relação à tabela 17 é devido a perdas no processo de moagem em moinho extrusor) o erro nessa tabela não é mostrado, pois, as balanças utilizadas possuíam erro menor que 0,1g nessa parte do experimento.

Amostra	massa a verde (g)	massa tratada (g)	remanescente (%)
Mistura	1.867	676	36,2
Alface	180,6	10,9	6,0
Arroz	268,8	90,1	33,5
Batata frita	18,5	13,8	74,6
Feijão	149,8	52,0	34,7
Frango	110,0	16,3	14,8

5.2.3.2 Moagem

A amostra de resíduos sintéticos foi moída ainda úmida em moedor de extrusão de maneira a facilitar processos posteriores de cominuição e melhorar a homogeneização da amostra. A Tabela 18 aborda o aspecto das propriedades químicas teórica da mistura alimentar utilizada como resíduo alimentar após a moagem e antes da secagem.

Após a secagem, amostra foi moída em um moinho de bolas por 24 horas, porém, devido à dureza do material, obteve-se apenas o arredondamento dos grãos da amostra de resíduos, sendo muito grandes para a briquetagem. Então, foi efetuada a moagem desses grãos em moinho de café, resultando em granulometria com 96% inferior a 1 mm. Adicionalmente, as amostras de arroz, batata frita e feijão foram moídas utilizando esse método, enquanto que as amostras de frango e alface foram moídas por pistilo e almofariz de porcelana.

5.2.3.3 Classificação

A amostra de resíduos sintéticos foi classificada em função de sua granulometria. Abaixo temos a distribuição granulométrica dos resíduos orgânicos alimentares após moagem em moinho de bolas seguida da moagem em moinho de café.

Tabela 20 Granulometria dos resíduos orgânicos alimentares sintéticos desidratados.

Granulometria	(%)
$d > 1\text{mm}$	5,7
$1\text{mm} > d > 0,300\text{mm}$	56,9
$0,300\text{mm} > d > 0,180\text{mm}$	26,9
$d < 0,180\text{mm}$	10,5

5.2.3.4 Briquetagem

A amostra de resíduos sintéticos foi briquetada a uma pressão de 50 MPa em matriz de 25mm de diâmetro em briquetes de aproximadamente 15g. As outras amostras também foram briquetadas em matriz de 25mm de diâmetro. A pressão de briquetagem usada para as amostras de alface, arroz, batata frita e feijão foi de 55 MPa.

Para as amostras de frango, a pressão de briquetagem utilizada foi de 63 MPa. As massas desses briquetes foram bastante variadas em função da disponibilidade de material. Já nas amostras de feijão e de arroz foram adicionados 5% em massa de água, pois mesmo com pressões de 72MPa e sem água, não se obteve briquetes com resistência necessária para o manuseio.

Essas pressões de briquetagem foram escolhidas em função da resistência ao manuseio dos briquetes á verde.

5.2.3.5 Carbonização e torrefação

As amostras de resíduos sintéticos alimentares, assim como as outras amostras individuais, foram torrefadas por 18h à 300°C. Metade das amostras da mistura alimentar e uma amostra de arroz foram retiradas após a torrefação. Posteriormente, a outra metade das amostras de resíduos alimentares sintéticos e o restante das amostras individuais foram carbonizadas por 1h a 590°C. A Tabela 21 apresenta a perda de massa durante a carbonização das amostras de resíduos alimentares sintéticos (mistura alimentar).

Tabela 21 Redução de massa de amostras de resíduos sintéticos alimentares durante a carbonização. Os valores comparativos com a carbonização de da madeira estão na Tabela 39 na página 76. O erro nessa tabela não e mostrado pois as balanças utilizadas possuíam erro menor que 0,01g nessa parte do experimento.

Carbonização e torrefação de briquetes de resíduos sintéticos alimentares em base seca.			
Tratamento térmico	a verde	18h à 300°C	Anterior mais 1h à 590°C
número de briquetes	14	7	7
Massa média (g)	15,03	6,63	3,89
Remanescente médio(base seca)	100%	44,1%	25,9%
Redução média (base seca)	0%	55,9%	74,1%

Já a Tabela 22 mostra a perda de massa dos componentes individuais durante a carbonização e torrefação

Tabela 22 Redução de massa de amostras individuais de componentes alimentares durante a carbonização. O erro nessa tabela não é mostrado, pois as balanças utilizadas possuíam erro menor que 0,01g nessa parte do experimento. *amostras umidificadas para a liga a verde.

Massa das amostras individuais (base seca)				
	Inicial (g)	18h á 300°C+1h a 600°C (g)	Remanescente	Redução
Alface	8,71	3,34	38,3%	61,7%
arroz*	15,3	3,03	19,8%	80,2%
Batata	3,71	1,01	27,2%	72,8%
feijão*	30,88	8,69	28,1%	71,9%
Amostra	Inicial (g)	18h á 300°C (g)	Remanescente	Redução
arroz*	15,16	5,03	33,2%	66,8%

Observa-se que a alface é o elemento individual que menos perdeu massa entre a secagem e a carbonização.

Quanto ao frango assado, não foi possível analisar a perda de massa, assim como não foi possível a análise imediata, pois a amostra vazou do invólucro de alumínio que protegia do oxigênio atmosférico.

O rendimento da carbonização e da torrefação de elementos dos resíduos alimentares mostrados em gráficos a seguir. No caso da carbonização, temos a comparação com a madeira de eucalipto da espécie *E. Grandis*.

Figura 26 rendimento da torrefação de briquetes de arroz e de resíduo alimentar sintético respectivamente

Figura 27 Rendimento da carbonização de diversas biomassas. *Madeira de E. Grandis [43,52].

Pode se observar que o rendimento da carbonização da mistura seca de resíduos alimentares ficou próximo do da madeira de eucalipto, que é comumente utilizado no carvoejamento de reflorestamento. Já a partir da alface seca, obteve-se maior rendimento em material carbonoso.

5.2.4 Caracterização dos carvões de resíduos sintéticos

5.2.4.1 Análise por microscopia eletrônica

As amostras de resíduos alimentares sintéticos torrefadas ($T_{\max}=300^{\circ}\text{C}$) e carbonizadas ($T_{\max}=590^{\circ}\text{C}$), assim como as de alface, batata frita, arroz, feijão e frango foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura.

A figura 25 apresenta elétrons secundários do briquete de alface.

Figura 28 Micrografia da alface carbonizada à 590°C observada com elétrons secundários. No retângulo vermelho vemos uma estrutura areolada

Observa-se a estrutura alveolar no retângulo vermelho similar a Figura 22b

No caso das amostras de batata frita e arroz carbonizadas, as microestruturas se mostraram parecidas com as amostras de amido de milho carbonizadas à partir de 215°C encontradas na literatura [69].

Figura 29 Micrografia da batata frita carbonizada à 590°C observada com elétrons secundários.

Figura 30 Micrografia do arroz carbonizado à 590°C observada com elétrons secundários.

A microestrutura do feijão já apresentou certa diferença em relação à batata e ao arroz, apesar de ser um alimento rico em amido.

Figura 31 Micrografia do feijão carbonizado à 590°C observada com elétrons secundários.
Observa-se a microestrutura diferente

No caso da carne de frango, a microestrutura apresentada é bastante diferente em relação à dos outros componentes.

Figura 32 Micrografia do peito de frango grelhado carbonizado à 590°C observado com elétrons secundários. Vê-se uma microestrutura contínua

Figura 33 Micrografia da amostra de resíduos sintéticos alimentares torrefada à 300°C observada com elétrons secundários.

No caso das amostras de mistura alimentar, observa-se apenas a microestrutura presente em amido.

Figura 34 Micrografia da amostra de resíduos sintéticos alimentares carbonizada à 590°C observada com elétrons secundários. Essa micrografia de elétrons está maior que as outras micrografias desse tipo, pois o aumento desta é de 250x e as outras micrografias de elétrons secundários são de 500x para possibilitar a comparação das microestruturas.

Não foi observada a microestrutura fibrosa nessas amostras tanto na microestrutura da amostra de resíduos sintéticos(ou mistura alimentar) torrefadas a 300°C (Figura 33) quanto a carbonizada(Figura 34). As amostras derivadas da mistura alimentar não apresentaram diferenças significativas entre si e em relação à do amido carbonizado [69]. Porém, as estruturas apresentaram menos bolhas.

Nas análises de EDS das amostras a seguir, foram observadas uma matriz escura e fases brancas. A composição dessas fases brancas variou, sendo algumas com ferro, sugerindo a presença de contaminantes da moagem e outras regiões brancas com álcalis presentes.

A matriz escura apresentou composição rica de carbono, com a presença de outros elementos. O carvão de resíduos sintéticos foi analisado nos pontos da Figura 35 e apresentou a composição descrita na Tabela 23.

Figura 35 Micrografia da amostra de resíduos alimentares sintéticos, carbonizada à 590°C observada em EDS. Vê-se uma fase escura com pontos brancos, sendo os pontos brancos ricos de álcalis

Tabela 23 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão de resíduos alimentares sintéticos carbonizado à 600°C em vários pontos

Elemento	EDS Spot 1	EDS Spot 2	EDS Spot 3
C	✓	✓	✓
N		✓	✓
O	✓	✓	✓
Na	✓		
Fe	✓	✓	
Mg	✓	✓	✓
Al	✓	✓	
Si	✓	✓	
P	✓	✓	✓
Cl	✓	✓	✓
K	✓	✓	✓
Ca		✓	

A alface foi analisada em dois pontos da Figura 36e sua composição desses pontos está na Tabela 24 Os pontos brancos apresentaram a presença de álcalis.

Figura 36 Análise de EDS da amostra de alface.

Tabela 24 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão da amostra de alface em vários pontos.

Elemento	EDS Spot 1	EDS Spot 2
C	✓	✓
N		
O	✓	✓
Na	✓	
Fe	✓	
Mg		✓
Al	✓	
Si	✓	
P	✓	✓
S	✓	
Cl	✓	✓
K	✓	✓
Ca		✓
Ti	✓	

O arroz foi analisado em duas micrografias distintas. Na Figura 37 analisou-se a matriz carbônica e na Figura 38 os pontos de óxido. Na Tabela 25 está descrita a composição em massa.

Figura 37 Micrografia da amostra de arroz cozido carbonizado à 590°C vista em EDS. Analisa-se nessa micrografia a composição da matriz com brilho diferente ao da Figura 38

Figura 38 Micrografia da amostra de arroz cozido carbonizado à 590°C vista em EDS. Vê-se uma fase escura com pontos brancos, sendo os últimos analisados

Tabela 25 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão da amostra de arroz cozido em vários pontos e áreas selecionados

Elemento	Figura 37			Figura 38	
	Área selecionada 1	Área selecionada 2	EDS Spot 1	EDS Spot 1	EDS Spot 2
C	✓	✓	✓	✓	
N	✓	✓	✓		
O	✓	✓	✓	✓	✓
Fe					✓
Mg				✓	
P				✓	✓
K				✓	✓

Observa-se a presença de ferro na região clara da Figura 38 que possivelmente trata-se de contaminantes oriundos da moagem por moinho de café

A batata frita apresentou sua composição por EDS aferida sobre a Figura 39 e os resultados na Tabela 26. Observa-se que o EDS Spot 1 contém ferro, possivelmente também, contaminante da moagem.

Figura 39 Micrografia da amostra de batata frita carbonizada à 590°C vista em EDS. Vê-se uma fase escura com pontos brancos, sendo os pontos brancos ricos de álcalis ou ferro.

Tabela 26 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão de batata frita em vários pontos.

Elemento	EDS Spot 1	EDS Spot 2	EDS Spot 3	EDS Spot 4
C	✓	✓		✓
N				✓
O	✓	✓	✓	✓
Fe	✓	✓	✓	✓
Mg			✓	✓
Si	✓	✓		
P			✓	✓
S				✓
Cl			✓	✓
K	✓	✓	✓	✓

Já no caso do feijão, a área branca analisada apresentou ferro (Figura 40). Por ser um alimento rico de ferro, não dá para saber se origem do ferro é do alimento ou de contaminantes da moagem.

Figura 40 Micrografia da amostra de feijão preto cozido carbonizado à 590°C visto em EDS. Vê-se uma fase escura com pontos brancos, sendo os pontos brancos ricos de ferro.

A composição da análise do carvão de feijão corresponde à Figura 40 e está descrita na Tabela 27 a seguir.

Tabela 27 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão da amostra de feijão preto cozido em vários pontos e em uma área selecionada

Elemento	EDS Spot 1	EDS Spot 2	Área selecionada 1
C	✓	✓	✓
N		✓	✓
O	✓	✓	✓
Fe	✓		
Mg		✓	
P		✓	✓
S	✓		
K	✓	✓	✓

Quanto ao frango, não apresentou fases com ferro, apenas a matriz com carbono e uma fase mais clara. Sobre a Figura 41 efetuou-se a análise de EDS, sendo os dados presentes na Tabela 28, ambos na página a seguir.

Figura 41 Micrografia da amostra de frango grelhado carbonizado à 590°C visto em EDS.

Tabela 28 Elementos encontrados por microanálise química por EDS do carvão da amostra de frango em várias áreas selecionadas e em um ponto.

Elemento	Área selecionada 1	Área selecionada 2	Área selecionada 3	EDS Spot 1
C	✓	✓	✓	✓
N	✓	✓	✓	✓
O	✓	✓	✓	✓
Na	✓	✓	✓	✓
Mg	✓	✓	✓	✓
Al	✓	✓		
P	✓	✓	✓	✓
Cl	✓	✓		✓
K	✓	✓	✓	✓

Convém lembrar que as análises por EDS não são tão precisas quanto às análises químicas para elementos de número atômico menor que o flúor, por isso esse método só aponta a presença do elemento na amostra de maneira qualitativa e não quantitativa e por isso as tabelas não apresentaram valores numéricos.

5.2.4.2 Análise imediata

Foi realizada a análise imediata das amostras de resíduos alimentares sintéticos (ou mistura) torrefadas e carbonizadas, bem como as amostras dos componentes individuais. (Vide a Tabela 29 na página a seguir)

Tabela 29 Análise imediata das amostras alimentares

	Voláteis (%)	Carbono fixo(%)	Cinzas(%)
Mistura torrefada (300°C)	36,2	60,9	2,9
Mistura carbonizada (590°C)	8,3	86,4	5,3
Alface	7,6	62,9	29,5
Arroz	15,0	82,8	2,2
Batata frita	11,8	78,2	10,1
Feijão	11,0	84,8	4,2

Observa-se que os teores de carbono fixo foram maiores para os carvões de mistura e para o feijão preto.

5.2.4.3 Teste de resistência mecânica dos briquetes de resíduos alimentares

Os carvões de resíduos sintéticos, também comprimidos á 20 mm por minuto, apresentaram resistência à compressão mais elevada que a dos resíduos coletados, como mostra a Tabela 30, possivelmente devido ao aquecimento mais lento da temperatura ambiente até o patamar isotérmico.

Tabela 30 Resistência à compressão dos materiais carbonosos de resíduos orgânicos sintéticos

Teste de resistência à compressão (em MPa)			
Torrefadas(T=300°C)		Carbonizadas(T=590°C)	
Amostra n°	Limite de resistência	Amostra n°	Limite de resistência
1	8,33	1	4,16
2	7,67	2	3,56
3	7,96	3	3,80
4	9,62		
Média	8,40	Média	3,84

Além disso, verificou-se que a resistência mecânica dos resíduos torrefados ($T_{\max} = 300^{\circ}\text{C}$) apresentou valores acima da resistência à compressão de carvões vegetais (de eucalipto) no sentido da fibra. Porém, as amostras dos resíduos

carbonizados ($T_{\max} = 590^{\circ}\text{C}$) ficaram dentro da faixa de resistência mecânica dos carvões [75].

5.2.4.4 Elementos presentes no carvão.

O carvão de resíduos orgânicos alimentares apresentou teores de elementos químicos de cinzas compatíveis com os alimentos de origem, a concentração aumenta conforme os materiais voláteis são eliminados.

Na tabela a seguir temos os teores de elementos químicos presentes nos resíduos alimentares esperados e obtidos.

Tabela 31 elementos presentes nos resíduos orgânicos alimentares e nos derivados carbônicos, esperados e obtidos

Teores de elementos químicos presentes nos carvões de resíduos orgânicos									
Estado	em (%)		Na	Mg	Obtido (ppm)				
	total	cinzas			P	K	Ca	Mn	Fe
Úmido	100	0,49	90	280	640	1860	140	10	150
Seco	36,21	1,355	240	780	1770	5130	390	20	430
Torrefado	15,86	3,093	540	1790	4040	11710	900	40	970
carbonizado	9,24	5,305	930	3070	6930	20090	1550	70	1670

Estado	em (%)		Na	Mg	Esperado (ppm)				
	total	cinzas			P	K	Ca	Mn	Fe
Úmido	100	0,512	34	99	452	126	106	3	04
Seco	36,21	1,414	93	272	1248	349	294	8	10
Torrefado	15,86	3,228	211	622	2850	797	671	18	23
carbonizado	9,24	5,538	362	1067	4889	1368	1150	30	39

Equação 6 cálculo dos teores de elementos baseados na literatura e na composição das cinzas, usados na tabela acima.

$$\%Elm_{obtido} = \%Elm_{cinzas} \cdot \frac{m_{cinzas}}{m_{estado}} \quad (a)$$

$$\%Elm_{esperado} = \%Elm_{teórico} \cdot \frac{m_{estado}}{m_{a\ verde}} \quad (b)$$

É possível ver a presença de elementos como potássio e sódio nos resíduos sendo assim para cada 1000 toneladas desse carvão, obtêm se aproximadamente 5 toneladas de fósforo.

5.2.5 Carvões recarbonizados

Os carvões recarbonizados foram feitos com a mistura de carvão de resíduos sólidos alimentares sintéticos carbonizados a 600°C e resíduos orgânicos alimentares sintéticos secos e moídos. A proporção entre os resíduos é de acordo com a tabela abaixo

Tabela 32 mistura de resíduos orgânicos secos e moídos e carvão de resíduos alimentares de alta temperatura. O carvão foi moído até granulometrias menores que 0,05mm, e os resíduos apresentam granulometrias menores que 0,180mm.

Componente	Composição (%)
Carvão de resíduos alimentares sintéticos carbonizados á 600°C	79,9
Resíduos alimentares sintéticos secos	20,1

As amostras de resíduos sintéticos foram briquetadas em matriz cilíndrica de 10 milímetros de diâmetro. A perda de massa durante a carbonização foi maior que o esperado, pois esperava-se que apenas a fração de material virgem sofresse perda de massa, algo que não ocorreu. Os resultados são apresentados na tabela abaixo

Tabela 33 Massa total e individual dos briquetes carbonizados e a respectiva perda de massa desse material. Nessa tabela também apresenta a perda de massa calculada com base em experimentos anteriores e supondo que a fração de carvão já carbonizada não perde massa. O erro nessa tabela não e mostrado, pois, as balanças utilizadas possuíam erro menor que 0,01g nessa parte do experimento.

Briquetes	A verde	Tratado
Numero	12	
soma das massas (g)	18,11	13,90
Média (g)	1,51	1,16
	esperado(%)	obtido(%)
remanescente	85,13	76,73
redução	14,87	23,27

5.2.5.1 Teste de resistência mecânica dos briquetes

Os valores para a resistência mecânica ficaram próximos dos carvões carbonizados a 600°C e não ficaram mais resistentes como se esperava de um material mais compacto como se observa na tabela abaixo.

Tabela 34 Resistência mecânica dos briquetes recarbonizados e a força aplicada

Resistência mecânica dos briquetes recarbonizados	
(Amostra nº)	(MPa)
1	1,22
2	1,25
3	1,25
4	1,14
média:	1,22

5.2.5.2 Aspectos microestruturais

A microestrutura dos carvões recarbonizados ficou diferente das dos carvões anteriormente feitos. Essa microestrutura ficou com aspecto de “blocos” ou “torrões”, com pouca área de contato como verifica se nas Figuras Figura 42 e Figura 43

Figura 42 Micrografia em elétrons secundários dos briquetes recarbonizados.

Figura 43 Microestrutura em elétrons secundários mostrando a estrutura em cascalho

Possivelmente essa microestrutura com poucas áreas de contato seja a causa da baixa resistência do material

5.2.6 Torrefação por tempo prolongado

Com o intuito de obter materiais carbonáceos com melhores propriedades mecânicas, efetuou se a torrefação de resíduos alimentares sintéticos á 230°C por 45 horas.

A mistura de resíduos orgânicos secos e moídos foi briquetada em briquetes de 15g cada em matriz de 25mm de diâmetro.

Visualmente as amostras ficaram semelhantes aos das amostras torrefadas á 300°C por 18 horas.

5.2.6.1 Perda de massa

Quanto a perda de massa em relação aos resíduos alimentares secos, esses briquetes torrefados em baixa temperatura e longo tempo ($T=230^{\circ}\text{C}$, $t=45$ horas), foi aproximadamente aos dos briquetes torrefados por 300°C por 18 horas, assim como o remanescente médio (Tabela 35).

Tabela 35 Perda de massa dos Briquetes torrefados a 230°C por 45 horas.

Briquetes com massa inicial = $15\text{g}(\pm 0,01\text{g})$	
Remanescente médio (g)	Rendimento médio (%)
7,85	52,3

Para visualizar melhor o rendimento da torrefação dos resíduos orgânicos sob esse tratamento prolongado, temos o gráfico na Figura 44, comparando o rendimento da torrefação sob esse tratamento térmico com os briquetes torrefados á 300°C á 17 ou 18h.

Figura 44 Rendimento na forma de material carbonáceo após a torrefação. As duas primeiras colunas do gráfico referem se a tratamentos aplicados em resíduos orgânicos alimentares sintéticos, já as duas últimas referem se a tratamentos aplicados a amostras de resíduos alimentares chamado de “e”.

Pode se observar que o rendimento em biomassa não se diferenciou de outros tratamentos na questão de massa, porém os carvões tratados por 1h a 350°C e 17h a 300°C assim como os carvões tratados á 300°C por 17h utilizou os resíduos orgânicos coletados e não os sintéticos.

5.2.6.2 Análise imediata

A análise imediata mostrou que a esses materiais carbonosos são constituídos em metade de materiais voláteis, outra metade de carbono fixo, e uma quantidade residual de cinzas. Valores esses mostrados na tabela abaixo

Tabela 36 A análise imediata do material de torrefação lenta. Trata se de material seco, portanto o teor de umidade não é significativo

Carvões torrefados por 230°C por 45 horas (%)	
Material volátil	54,6
Carbono fixo	43,1
Cinzas	2,3

No gráfico abaixo temos o comparativo do carbono fixo dos resíduos orgânicos alimentares que passaram por tratamento curto e pelo tratamento prolongado assim como o material não tratado

Figura 45 Carbono fixo de materiais derivados de resíduos orgânicos alimentares sintéticos.

Pode se observar que o carbono fixo ficou ligeiramente menor que no tratamento de 300°C por 18 horas, porém mais alto que no material apenas seco.

5.2.6.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica dos briquetes torrefados a 230°C apresentou grande variação. A resistência variou de 5,7 MPa até 15,2 MPa. A tabela abaixo mostra os resultados de resistência das amostras

Tabela 37 Resistência mecânica dos Briquetes torrefados á baixas temperaturas e tempo prolongado

Resistência mecânica dos briquetes torrefados por 45 horas	
(Amostra nº)	(MPa)
1	15,2
2	11,6
3	5,7
4	8,2
média:	10,2

A média da resistência das amostras ficou numericamente maior que a média da resistência dos briquetes torrefados a 300°C por 18 horas, mas estatisticamente não dá para afirmar que as médias são diferentes devido ao tamanho da amostra e a sua variância.

Abaixo temos o gráfico mostrando os resultados obtidos por esse processamento comparado à média dos briquetes processados á 300°C por 18 horas.

Figura 46 Comparativo da resistência mecânica de materiais carbonosos oriundos da torrefação de resíduos orgânicos alimentares sintéticos.

É sugerido que a maior resistência seja devido à presença de materiais voláteis.

5.2.6.4 Microestrutura

A microestrutura desse material carbonáceo é apresentada na figura 44, na próxima página. Pode-se verificar que a microestrutura apresenta estruturas porosas típicas de materiais carbonizados ricos em amido porem com algumas regiões contínuas, com porosidade ausente, como visto no quadrante inferior direito.

Sugere-se que a estrutura mais contínua confira melhores propriedades mecânicas à frio, obtidas nos briquetes.

Figura 47 Micrografia em elétrons secundários com aumento de 500x do briquete de resíduos orgânicos alimentares sintéticos torrefado á 230°C por 45 horas. Observa-se a ocorrência de microestrutura mais compacta na parte inferior esquerda da imagem.

5.3 ANÁLISES COMPARATIVAS DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS

5.3.1 Análise química dos resíduos orgânicos alimentares

Os resíduos orgânicos alimentares sintéticos colhidos tiveram suas cinzas analisadas por fluorescência de raios X e apresentaram sua composição de acordo com a Tabela 38.

Pode-se observar que na amostra de cinzas dos resíduos colhidos tivemos teores maiores de óxido de sódio do que nos resíduos sintéticos, devido aos sais utilizados para temperar a comida. Outra diferença é o teor de sílica maior nos restos alimentares coletados. A perda ao fogo pode ocorrer devido não só à temperatura de queima ser maior na análise química do que na análise de cinzas, como também ao tempo entre a obtenção das cinzas e a análise química em laboratório, que favorece a absorção de água do presente no ar.

Tabela 38 Resultados das análises químicas das amostras de cinzas dos resíduos orgânicos.

*São os óxidos de elementos que tiveram porcentagem menor que 0,1% em ambas as amostras, sendo eles: os óxidos de Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo e de W.

Amostra tipo:	Análise química das cinzas(%)	
	Resíduos Sintéticos	Resíduos colhidos
Na ₂ O	1,60	21,10
MgO	6,52	4,63
Al ₂ O ₃	4,81	3,30
SiO ₂	9,06	32,10
P ₂ O ₅	21,00	19,80
SO ₃	2,19	0,16
Cl	0,04	0,14
K ₂ O	31,00	5,89
CaO	2,77	3,61
MnO	0,12	0,07
Fe ₂ O ₃	3,05	1,08
CoO	0,02	0,28
Outros*	0,19	0,69
Perda ao fogo	17,50	7,00

Cabe ressaltar que os teores de óxido de fósforo apresentaram teores próximos a 20% em ambas as amostras.

5.3.2 Rendimento da carbonização dos resíduos orgânicos alimentares

No gráfico abaixo, observa-se o rendimento da carbonização de resíduos alimentares sintéticos e coletados em relação a madeira de eucalipto (*E. Grandis*) [43,52].

Figura 48 Rendimento da obtenção de carvões de resíduos alimentares e de madeira de eucalipto em relação ao material úmido. Entende-se que a carbonização se dá a temperaturas superiores a 550°C .

Na Tabela 39 observa-se o rendimento da carbonização com mais detalhes

Tabela 39 Rendimento dos processos de carbonização dos resíduos sólidos alimentares comparados com o da espécie de eucalipto *E.grandis* [52] [43]

Condição	Resíduos sólidos alimentares		Eucalipto (<i>E.grandis</i>) (%)
	Sintéticos (%)	Coletados (%)	
Úmido	100,00	100,00	100,00
Seco	36,21	29,57	49,00
torrefado(Tmax = 300~350°C)	15,86	16,19	
carbonizado(Tmax = 550~600°C)	9,24	8,58	13,82
Desvolatilizado	8,47	7,78	12,42
Cinzas	0,49	0,67	0,46

Nota-se que o rendimento do eucalipto é maior do que o dos restos alimentares. O eucalipto pode ser seco apenas deixando exposto ao ambiente, algo que não é possível fazer com os resíduos alimentares, pois atraem insetos e são mais suscetíveis à perda de propriedades devido à ação de micro-organismos.

5.4 AUTO REDUÇÃO

5.4.1 Pelota auto-redutora

Sabendo das propriedades dos briquetes carbonizados por tempo prolongado e em baixa temperatura, fabrica-se briquetes compostos de minério de ferro tipo pellet feed, carvão de resíduos orgânicos carbonizados á 300°C por 18h e 1h á 600°C, e resíduos orgânicos alimentares sintéticos secos. A composição utilizada está na tabela abaixo

Tabela 40 Materiais utilizados nas pelotas. A utilização de resíduos alimentares sintéticos secos e a água era com o objetivo de dar liga a mistura auto redutora. O pellet feed proveio de amostra fornecida pela Vale S.A. e posteriormente moída no laboratório a granulometrias menores que 200 mesh. *Carvão de resíduos alimentares sintéticos carbonizado 300°C por 18 horas e 600°C por 1 hora.

Material utilizado na preparação das Pelotas auto redutoras de resíduos alimentares	(%)
Resíduos alimentares secos	16,17
Carvão de resíduos* 600°C	7,80
Pellet feed da Vale AS	40,43
Água adicionada	35,6

O pellet feed utilizado tem a composição da Tabela 41 a seguir.

Tabela 41 Composição mássica do Pellet feed fornecido pela Vale S.A. que é basicamente composto por óxidos de ferro. *Perda ao fogo.

Composição do pellet feed utilizado (%)	
Fe(t)	67,7
SiO₂	0,67
Al₂O₃	0,61
CaO	0,03
MgO	0,06
P	0,03
Mn	0,29
TiO₂	0,04
P.F.*	1,44

Carboniza-se por 50 horas a 215°C com o objetivo de que ocorra a fusão do amido dos resíduos orgânicos alimentares e assim o agregado resultante seja de alta resistência.

Para melhorar a homogeneização, realiza se a mistura com água quente para que ocorra a gelatinização dos amidos dos resíduos secos e assim.

5.4.2 Teor de carbono fixo teórico

Os agregados auto redutores tem a composição em que o carbono fixo seja suficiente para reduzir o Fe_2O_3 em ferro metálico e em CO, sendo assim a razão mássica estequiométrica de Fe_2O_3 para C_{fixo} , é de 160 para 36 .Porem o agregado auto redutor deve possuir mais carbono fixo que a razão estequiométrica.

O carvão de resíduos orgânicos carbonizados a 600°C possui 86% de carbono fixo e os resíduos alimentares secos possui 20% de carbono fixo e a partir desses dados, calcula se a quantidade de material a ser adicionado. Para dar liga à pelota, foi adicionado água na proporção de 35%. Na tabela abaixo temos a composição da pelota à verde utilizada.

Tabela 42 Composição calculada da mistura auto redutora, na forma de pelotas, de resíduos alimentares.

Componente:	(%)
Umidade adicional	35,6
voláteis	12,8
cinzas	0,6
carbono fixo	10,6
minério de ferro	40,4
Elemento ferro	28,3

5.4.3 Perda de massa

Os agregados auto redutores produzidos por esse método apresentou a seguinte perda de massa durante a secagem à temperatura ambiente e a respectiva recarbonização, que corresponde a perda de umidade, e a de parte dos voláteis dos resíduos alimentares não processados. Abaixo temos a tabela mostrando a perda de massa no processo

Tabela 43 Perda de massa durante a recarbonização das pelotas auto-redutoras. O erro da pesagem é inferior a 0,01g

Massa do material na forma de pelotas (g)				
a verde	Seca ao ambiente		Torrefada	
	Massa (g)	Umidade (%)	Esperado	Obtido
92,8	65,0	6,8	51,6	52,5

5.4.4 Estrutura e resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica a frio das pelotas não apresentaram bons resultados, sendo inferiores as 20N e friáveis ao toque, abaixo mesmo da resistência mecânica para materiais semelhantes [39].

Sugere-se que a resistência deficiente seja por causa da estrutura macroscópica resultante. Abaixo vemos a fotografia de uma pelota antes da redução, e observa-se que é bastante porosa

Figura 49 Fotografia de um exemplar de pelota auto-redutora não reduzida lixada até a metade exibindo falhas em sua estrutura.

A microestrutura da pelota possui partes semelhantes às microestruturas de carvões carbonizados em baixa temperatura e outras estruturas angulares e irregulares. A microestrutura é descrita na Figura 50 na página a seguir.

Figura 50 Micrografia de elétrons retro espalhados com aumento de 500x efetuada antes da redução de pelota auto redutora de resíduos alimentares sintéticos exibindo grãos de ferro e materiais carbonosos em sua estrutura.

Possivelmente a microestrutura não seja a causa da baixa resistência mecânica

5.4.5 Análise de redução e microestrutura do reduzido.

Para testar o potencial de redução das pelotas auto-redutoras de minério de ferro, efetuou-se a redução isotérmica a 1000°C em atmosfera de nitrogênio, em forno de poço.

Espera-se que a massa final seja de 70% da fração inicial de minério de ferro, mais o carbono fixo em excesso, supondo uma redução completa a ferro metálico.

Verifica-se quanto tempo demora a redução medindo a variação de massa com o tempo, e quando cessa a variação, conclui-se que a redução foi efetuada. Na Figura 51 na página a seguir temos o gráfico mostrando a termogravimetria.

Figura 51 análise termogravimétrica da redução de pelotas auto redutoras com materiais oriundos de resíduos alimentares sintéticos

Para checar se ocorreu a redução, verifica se a microestrutura e a composição, sendo que a microestrutura está descrita na figura abaixo.

Figura 52 Micrografia em elétrons secundários com aumento de 500x da pelota reduzida de minério de ferro.

Pode se observar uma estrutura com filamentar. Esses filamentos tiveram sua composição analisada por EDS. Na página a seguir pode-se ver a figura e os pontos analisados e a respectiva tabela da composição. (Figura 53 e Tabela 44)

Figura 53 micrografia em EDS do ferro filamental analisado em 3 pontos

Tabela 44 composição química dos pontos das estruturas filamentosas obtida por EDS. O Erro é proporcional ao teor do elemento analisado (erro relativo)

	EDS spot 1		EDS spot 2		EDS spot 3	
	Fração (%)	Erro (%)	Fração (%)	Erro (%)	Fração (%)	Erro (%)
C	6,55	12,46	2,05	16,36	1,74	17,14
O	2,05	11,11	2,53	9,46	0,59	17,06
P	0,02	74,56	0,38	32,52		
K	0,16	57,27				
Fe	70,68	1,78	95,04	1,78	97,67	1,75

Foi também analisada a composição em uma área da pelota reduzida.

Para elementos como ferro, a análise por EDS é mais confiável, mas para o carbono não. Na página seguinte temos a figura e a tabela da composição química por EDS de uma área analisada (Figura 54 e a Tabela 45).

Ferro filamental pode ocorrer em agregados auto-redutores, porém não é típica a ocorrência de ferro filamental como estrutura dominante [39].

Figura 54 Área analisada por EDS da pelota reduzida

Tabela 45 Composição química por EDS de uma área da pelota reduzida O Erro é proporcional ao teor do elemento analisado

	Fração mássica (%)	Erro relativo (%)
C	15,6	11,26
O	3,12	10,94
Al	0,35	26,51
Si	0,48	17,77
K	0,55	19,31
Ca	0,26	22,27
Fe	79,64	1,86

O objetivo desse estudo é de verificar a cinética de redução dos materiais oriundos de resíduos orgânicos alimentares, portanto aqui não são abordadas as possíveis causas da formação dessa microestrutura atípica.

Outro problema para utilizar resíduos orgânicos como material redutor é o teor elevado de fósforo e de materiais alcalinos como o potássio presentes nesse material, que prejudica a redução de ferrosos.

6 CONCLUSÕES

Os experimentos provaram ser possível carbonizar ou torrefar resíduos orgânicos alimentares previamente secos. As observações dos resíduos alimentares coletados feitas por microscopia eletrônica revelaram a presença de duas microestruturas dominantes, aparentemente uma derivada de amido e outra de fibras. Nos resíduos alimentares sintéticos apenas a fase presente em carvões de amido foi observada, enquanto a fase fibrosa foi observada em carvões obtidos de alface crespa.

Os testes de resistência mecânica dos briquetes sugerem que os restos alimentares torrefados (carbonização com temperatura máxima entre 300°C e 350°C) tenham melhores propriedades mecânicas que os carbonizados (carbonização com temperatura máxima entre 590°C e 600°C). Os resultados para carvões torrefados a temperaturas menores (230°C por 45 horas) apresentaram resultados numéricos melhores que os outros briquetes torrefados, porém de caráter não conclusivo.

Os carvões recarbonizados apresentaram resultados piores que os de carbonização simples. Sugere-se que isso seja devido a granulometria fina do carvão de resíduos orgânicos moídos, que possivelmente isolou os grãos bem maiores de resíduos orgânicos secos e moídos.

As cinzas dos resíduos orgânicos alimentares detectaram altos teores de fósforo (cerca de 20% de P_2O_5 ou 9% do elemento nas cinzas), sendo que o fósforo compromete a qualidade de materiais ferrosos. A presença do fósforo também foi detectada nas análises por EDS na microscopia eletrônica. Os teores de potássio nas cinzas do carvão também são bastante altos, o que pode prejudicar o emprego do mesmo como redutor.

A redução de minério de ferro pelo carvão de resíduos, na forma de pelota auto-redutora, demonstrou ser possível, porém as pelotas produzidas não tiveram resistência. A estrutura proveniente da auto-redução mostrou-se atípica para materiais ferrosos oriundos de agregados auto-redutores, com formação de ferro filamentar. Esse ferro filamentar pode ter aplicações, de maior valor agregado, como na fabricação de catalisadores devido a sua grande área superficial.

O carbono fixo da base úmida dos resíduos alimentares foi menor que o carvão de eucalipto (resíduos recém-recolhidos e madeira recém-cortada). Para

cada tonelada de resíduos sólidos alimentares recém-colhidos, obtém-se cerca de 75kg de carbono fixo, enquanto para cada tonelada de madeira de eucalipto recém-cortado, obtém-se cerca de 120kg de carbono fixo.

A utilização de materiais voláteis pode ser o objetivo de outros estudos, pois foi encontrado em grande quantidade nas amostras torrefadas, principalmente a composição e o fracionamento desse material.

Além do carbono fixo ser menor nos resíduos sólidos, a secagem passiva dos resíduos orgânicos, de forma análoga à da madeira, não é possível. Porém a utilização de fornos de secagem á energia solar pode viabilizar a secagem dos resíduos orgânicos na questão da energia.

A carbonização de resíduos alimentares é viável tecnicamente e pode fazer parte de processo integrado de tratamento de resíduos orgânicos e minimizar a necessidade de aterros. Também pode ser obtido produtos de maior valor agregado em relação aos combustíveis de siderurgia, como materiais catalíticos

8 BIBLIOGRAFIA

1 FOLHA de SÃO PAULO Prefeitura desativa usina de compostagem da Vila Leopoldina, 31 de Agosto de 2004.

2Nogueira, AEA. Estudo da redução de minérios de ferro na forma de pelotas ou misturas autorredutoras em forno rotativo, Dissertação de Doutorado, São Paulo : Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais da Escola Politécnica da USP; 2010.

3Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. Classificação resíduos sólidos NBR 10.004. 2006. [Acesso em 21 de agosto de 2015].Disponível em:
<http://www.abetre.org.br/biblioteca/publicacoes/publicacoesabetre/classificacao-de-residuos>.

4 AMBIENTEBRASIL:Resíduos: Classificação origem e características. [Acesso em julho de 2016] .Disponível em:
<http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/residuos/classificacao_origem_e_caracteristicas.html>.

5PereiraNeto, JT. Gerenciamento do lixo urbano: aspectos técnicos e operacionais. Ed UFV, Viçosa 2007.

6Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. Novo informe da FAO sobre o impacto ambiental do desperdício de alimentos.2013. [Acesso em: julho de 2016]. Disponível em:
<https://www.fao.org/niFAOsiada.asp>.

7 ONG Banco de Alimentos. Desperdício de alimentos.[Acesso em 8 de abril de 2016]. Disponível em: <http://www.bancodealimentos.org.br/conheca-banco-de-alimentos/desperdicio-de-alimentos-brasil-e-mundo>.

8 UNEP, SENAC-RJ. Avaliação do desperdício de alimentos em restaurantes comerciais do município do Rio de Janeiro, Green Rio, Rio de Janeiro, 2014. Apresentação de slides.

9Pires, CS. O tratamento de resíduos orgânicos como cumprimento da política nacional de resíduos sólidos. Tese de mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Programa de Pós Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos; 2013.

10Foresti, E. . Fundamentos do Processo de Digestão Anaeróbia.In: Maria Viñas; Matilde Soubes; Liliana Borzacconi; Lucia Muxi. (Org.). Tratamento Anaeróbio. Montevideo: Universidad de la Republica, 1994, p. 97-110.

11 Kiel, EJ. Manual de Compostagem, Maturação e Qualidade do Composto. 4a ed. Piracicaba, 173 p, 2004.

12 Mata-Alvarez, J. (Org.). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes.1a ed. Barcelona - Espanha: IWA Publishing, 2003.

13 Zhu, B.; Gikas, P.; Zhang, R.; Lord, J.; Jenkins, B.; Li, X.; Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor. Bioresour. Technol. 2009. 100 : 1122-1129.

14Tolmasquim, MT. (Coord.).Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

15 CISBRA- Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico da Região do Circuito das Águas: [Acesso em setembro de 2016]. Composteira do CISBRA. Disponível em: <http://www.cisbra.eco.br/content/composteira-do-cisbra>

16Visafertil, Website, [Acesso em setembro de 2016]. Disponível em: <http://www.visafertil.com.br/>.

17 Thomas AL, Reaproveitamento de resíduos Orgânicos na alimentação de Suínos [Acesso em outubro de 2017] Disponível em: http://www.hospitaissaudaveis.org/arquivos/SHS%202013_Ana%20Lucia%20Thomas1.pdf

18 Atitude Sustentável, Restos de comida das praças de alimentação viram ração para animais, 25 de maio de 2010, [Acesso em outubro de 2017] disponível em: <http://atitudesustentavel.com.br/blog/2010/05/25/restos-de-comida-das-pracas-de-alimentacao-viram-racao-para-animais/>

19Souza, JSI. Enciclopédia Agrícola Brasileira. Vol 1 A-B : EdUSP, 1995; aminoácidos.

20 NELSON, D. L. Principles of Biochemistry.6ª Edição. W. H. Freeman and Company; 2013.

21 LOPES, S. G. B. C. Bio.v.1. 5ª Edição. Editora Saraiva; 1999.

22 Souza, JSI. Enciclopédia Agrícola Brasileira.Vol. 4. I-M : EdUSP, 1995; lipídeos

23 Wikipedia. [Acesso em: agosto de 2016]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Biodiesel> . [Acesso em: agosto de 2016].Biodiesel

24Souza, JSI. Enciclopédia Agrícola Brasileira. Vol 1 A-B : EdUSP, 1995; amido.

25 ESALQ,Apresentação LCB 0208 sobre carboidratos, [Acesso em: julho de 2016]. Disponível em: <http://docentes.esalq.usp.br/luagallo/carboidratoS%20lcb208.ppt>.

26Lajolo, FM. et al. Carbohidratos em alimentos regionales iberoamericanos. São Paulo: Edusp; 2006.

27Huneault, Michel A. et al. Preparation and properties of extruded thermoplastic starch/polymer blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012; 126(1):96-108

28 Lai, S.-M. et al. Preparation and properties of biodegradable thermoplastic starch/poly(hydroxy butyrate) blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006; 100(3): 2.371-2.379.

29Cui, SW. *Food Carbohydrates*. Taylor & Francis: 2005.

30 28º Encontro de Debates sobre o Ensino de Química, 23 a 25 de agosto de 2008, ULBRA Canoas, RS Brasil, [Acesso: julho de 2016]; Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc29/03-CCD-2907.pdf>.

31Walter M; Marchezan E. ;Avila LA, Arroz: composição e características nutricionais, *Ciência Rural*. 2008;38(4):1184-1192.

32Weber FW; collares-queiroz FP. Chiang YK, Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose, *Ciência e tecnologia de alimentos*. 2009;29(4):748-753.

33Cauvain PS, Young SL, *Tecnologia de Panificação 2ª Edição*. Manole, 1999.

34 Wang, S. et al. Starch Retrogradation: A comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Safety* , 2015;14(5): 568-585.

35Chao Q , et al. Differences in physicochemical, morphological, and structural properties between rice starch and rice flour modified by heat treatment. *Starch Journal*. 2015: 67(5):756-764.

36Tumuluru JS, Wright CT, et al. Review on Biomass Torrefaction Process and Product properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development, Annual International Meeting Sponsored by ASABE; Agosto de 2011; Gault House. Louisville, Kentucky.

37Aantal, MJ, Gronli, M. The art, science, and technology of charcoal production. Indian Engineering Chemistry Research, New Delhi, 2013: 42 : 1619-1640.

38Protásio PP, Buffalino L, Ribeiro MX, Trugilio PF, Leite ER da S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos de processamento dos grãos de café. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012:16(11): 1252-1258.

39 Nogueira A, Takano C, Mourão MB, Pillihuaman A, The Self-Reducing Pellet Producing From Organic Household Waste, In: Jiang T. et al. (eds) 6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. 2015:41:323-330.

40 Costa LC. Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de forno de coque da Cosipa, Dissertação de Mestrado, São Paulo. Departamento de Engenharia elétrica da Escola Politécnica da USP; 2008.

41Campos ACM.et al. Carvão de Eucalyptus: Efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição de qualidade pela espectroscopia NIR. Lavras, Minas Gerais, Universidade Federal de Lavras, 2008.

42 Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério da Ciência e Tecnologia; Ministério de Minas e Energia; Ministério do desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Diretrizes de política de agroenergia 2006-2011. Brasília, DF, 2006. 33 p.

43 dos Santos GVR. et al. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*, ScientiaForestalis, 2003:63:214-220.

44 Brito OJ .et al. Características do eucalipto como combustível : Análise química imediata da madeira e da casca, IPEF, 1978:16:63-70.

[Acesso em junho de 2016]. Disponível em : <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf>.

45 Cardona LV. Estudo experimental da secagem e carbonização do Eucalipto Saligna para a produção de carvão vegetal. São Paulo: Dissertação de Mestrado : Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.; 2012.

46 Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, MG, 1980:1:158.

47 Campos ACM. Carvão de *Eucalyptus*: Efeito sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. Lavras MG: Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Lavras; 2008.

48 Martins H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO WR. (Ed.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, MG: CETEC, 1980:1:9-26.

49 Raad TJ. Drying process simulation and Eucalyptus ssp carbonization. 114p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

50 Syred C, Griffiths AJ, Syred N, Beedie D, James D. A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). Fuel. 2006;85: 1566-1578.

51 Trugilio PF, Lima JT, Akira FA, Lino AL . Avaliação de clones de Eucalyptus para produção de carvão vegetal. Lavras . 2001;7(2): 104-114.

52 Ribeiro TR. Estudo da Produção de Carvão Vegetal. Trabalho de formatura. São Paulo: Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais da Escola politécnica da USP, 2009.

53 Peláez-Samaniego MR, Garcia-Perez M, Cortez LB, Rosillo-Calle F, Mesa J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008;12(4): 1063-1086.

54 Naso PG. Carvão Vegetal: Análise do Processo de Carvoejamento. Trabalho de formatura. São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, 2010.

55 DPC, Processo de carbonização DPC. [Acesso: julho de 2016]. Disponível em: dpcbiomassa.com.br/40_mais.htm.

56 Sampaio RS. Conversão da biomassa em carvão vegetal situação atual com tendências 2025 Estudo Prospectivo do setor siderúrgico. Nota Técnica. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Belo Horizonte, MG, junho de 2008. [Acesso em: setembro de 2016]. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_conversao_tecnica_1531.pdf

57 Viena Iron S.A. Home Page Infraestrutura. [Acesso em: setembro de 2016]. Disponível em : <http://www.vienairon.com.br/institucional/infra.aspx>.

58 UENF: Ciclo do Carbono, [Acesso em 16 de maio de 2016]. disponível em: http://www.uenf.br/uenf/centros/cct/qambiental/q_ciclocarbono.html

59 Nasa Earth Observatory. The Carbon Cycle. [Acesso em: novembro de 2016]. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/page1.php>.

60 IPCC Working Group I. What is Greenhouse Effect?. Climate Change 2007, The Physical Science Basis : [Acesso em: novembro de 2016]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html.

61 PGL.Gal. Mudança climática e Dia Mundial do Ambiente, com os filmes “A Floresta Das Esmeraldas” e “Uma Verdade Inconveniente”. [Acesso em: 16 de maio de 2016]. Disponível em: <http://pgl.gal/mudanca-climatica-e-dia-mundial-do-ambiente-com-os-filmes-a-floresta-das-esmeraldas-e-uma-verdade-inconveniente/>.

62United Nations Environment Program. Climate Change. Introduction. [Acesso em: novembro de 2016]. Disponível em :<http://www.unep.org/climatechange/Introduction.aspx>

63 Lohri, C. R. et al. Urban biowaste for solid fuel production: Waste suitability assessment and experimental carbonization in Dar es Salaam, Tanzania. *Waste Management & Research*, 2015: 33(2): 175-182.

64Wang, X. et al. Preparation of novel porous carbon spheres from corn starch. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2009:346: 213-215.

65Zue X. et al. Preparation of potato starch-based carbon particles by low-temperature carbonization in oil. *Int. J. Mater. Research*, 2016:106(11):1196-1201.

66Xianjin Cui . et al, Structural Effects of Iron Oxide Nanoparticles and Iron Ions on the Hydrothermal Carbonization of Starch and Rice Carbohydrates. *Wiley-VCH*. 2006:6: 756-759.

67Liu X , Ma H, Yu L ,et al. Thermal-oxidative degradation of high-amylose corn starch. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014:115:659-665.

68Singh V, Okadome H, Toyoshima H , et al. Thermal and Physicochemical Properties of Rice Grain, Flour and Starch *J. Agric. Food Chem.* 2000:48 : 2639-2647.

69Xue Z , Peirong C. Effects of low-temperature carbonization temperature and time on morphology of carbon particles from maize starch. *International journal of Materials Research*. 2014:49(5):2180-2186.

70Oliveira VF, et al. Decomposição térmica do amido e dos resíduos alimentares. Trabalho de formatura, São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP São Paulo ; 2016.

71 TACO, Tabela Brasileira de composição de Alimentos, 4ª edição revisada e ampliada. Campinas-SP: Unicamp; 2011.

72 American Society for Testing and Materials. ASTM D293: Standard test method for the sieve analysis of coke, 2010.2p.

73 American Society for Testing and Materials. ASTM D3175-11: Standard test method for Volatile Matter in the analysis sample of coal and coke, 2011.2p.

74 American Society for Testing and Materials . ASTM D3175-11: Standard test method for Ash in the analysis sample of coal and coke from coal, 2011.2p.

75 Kurauchi MHN, et al. Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal. Dissertação de mestrado, São Paulo: Universidade de São Paulo; 2014.