

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DOS RECURSOS
RENOVÁVEIS

ROBMILSON SIMÕES GUNDIM

**APLICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) PARA
OTIMIZAR O USO DA PALHA DE CANA E CASCA DE EUCALIPTO COMO
FONTE DE ENERGIA TÉRMICA**

Sorocaba
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DOS RECURSOS
RENOVÁVEIS

ROBMILSON SIMÕES GUNDIM

**APLICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) PARA
OTIMIZAR O USO DA PALHA DE CANA E CASCA DE EUCALIPTO COMO
FONTE DE ENERGIA TÉRMICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis, para defesa do título de Doutor em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Orientação: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji
Coorientação: Dra. Gabriela Tami Nakashima

Sorocaba
2022

Simões Gundim, Robmilson

Aplicação do combustível derivado de resíduos (CDR) para otimizar o uso da palha de cana e casca de eucalipto como fonte de energia térmica / Robmilson Simões Gundim -- 2022.
159f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Fábio Minoru Yamaji
Banca Examinadora: Baltus Cornelius Bonse, Edilene de Cássia Dutra Nunes, João Lucio de Barros, Luis Ricardo Oliveira Santos
Bibliografia

1. Produção de combustível sólido. 2. CDR + casca de eucalipto e CDR + palha de cana. 3. Maior qualidade. I. Simões Gundim, Robmilson. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Robmilson Simões Gundim, realizada em 11/07/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Prof. Dr. Baltus Cornelius Bonse (FEI)

Profa. Dra. Edilene de Cássia Dutra Nunes (Fatec Mauá)

Prof. Dr. João Lúcio de Barros (IFSP)

Prof. Dr. Luis Ricardo Oliveira Santos (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Dedico este trabalho à Deus; aos meus pais baianos: Manoel e Júlia; às minhas irmãs, Rosicler, Rosângela e meu irmão Robson; à minha esposa, Cleide, pelo incondicional companheirismo, paciência e apoio dedicado; aos preciosos filhos Gabriela, Igor, Gustavo e Felipe; à encantadora neta Elis; às famílias Gundim, Gondim e Eufrázio; ao amor; e ao “cantador” e inspirador Rei do Baião: Luiz Gonzaga (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois chegar até aqui, foi Deus!

Agradeço ao grande professor, “escultor” e ser de luz, Prof Dr Fábio Minoru Yamaji pela sabedoria e orientação estratégica ao desenvolvimento deste trabalho e ao admirável apoio e incentivo dele e de seu sensacional grupo de pesquisa.

Agradeço à empresas Salmeron, Eucatex e à UfSCar-So e seus colaboradores pela disponibilidade da coleta de material e apoio à pesquisa.

Agradeço às professoras Cássia e Cristiane, aos professores Baltus, Lúcio, e Luis Ricardo (Tatuí), Gabriela e Ana Larissa, pela paciência, compreensão, apoio e fundamentais orientações e contribuições em ocasião das bancas de qualificação e defesa.

Agradeço aos professores Diogo, Fábio, Fátima, Fran, Miguel, Mônica e Cláudio pelo aprendizado nas disciplinas do curso.

Agradeço à eficiente e amada por todos “Lú”, da secretaria do PPGPUR, pela paciência, profissionalismo e instruções essenciais.

Agradeço à Juliana, revisora, pelo auxílio providencial.

Agradeço pelo apoio e orientações precisas do João, bem como pela sua paciência e boa vontade permanente.

Agradeço aos colegas de laboratório pelo companheirismo e pelo aprendizado: Moisés (amigão), Gabizinha, Texugo, João, Gabizona, Luciano, Ariane, Elias, Ana Larisa, Lucas e Tatuí e em especial aos incríveis e dedicados apoiadores alunos de IC: Alan, Bianca, Igor e Natália, bem como também, aos alunos que compartilhamos disciplinas: Jeferson (outro amigão), Daniela, Adriana, Louise, Lucas, Vitor, Thamires, Gabi Giusti, Rafael Francisco, Erick, Patrícia, para citar alguns.

Agradeço à Universidade Cruzeiro do Sul e em especial: à professora e amiga Magali, pelo incentivo e dicas oportunas e acertadas; à professora Cristhiane e ao Henrique, pelas preciosas colaborações; aos professores Samuel e Victor e assistentes do CETEC, pelo apoio total na coordenação dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção; à reitora Prof^a Dr^a Amélia e sua dedicada equipe de assessores; ao pró-reitor Prof Dr Fernando Dutra e ao Diretor Dr. Luiz Henrique, pela compreensão e apoio propício oferecido.

Agradeço ao SENAI-SP e à UFSCar-So, pela oportunidade da realização do doutorado, desafio que estava guardado em pensamento e que por iniciativa institucional associado ao esforço em estar preparado para candidatar-se, foi possível enfrentá-lo. Agradeço em especial à Escola SENAI “Hermenegildo Campos de Almeida” de Guarulhos-SP, pela formação desde os 14 anos de idade; pela torcida e apoio de todos(as) seus gestores(as), professores(as) e colaboradores(as). Agradeço imensamente ao Prof Ivan e à Prof^a Cássia da unidade SENAI “Celso Charuri” e ao Prof Alexandre Brás e ao Prof Fabiano e sua equipe, da unidade SENAI “Mário Amato” pelo acolhimento e aprendizados. Por fim, agradeço pelas experiências inesquecíveis vividas no doutorado.

“A vaca não dá leite”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

GUNDIM, R. S. **Aplicação do Combustível Derivado de Resíduos (CDR) para otimizar o uso da palha de cana e casca de eucalipto como fonte de energia térmica.** 2022. 159f..Tese (Doutorado em Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2022.

O combustível derivado de resíduos (CDR), caracterizado como parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é a sobra do processo de reciclagem de resíduos ainda não descartados em aterros. A indústria cimenteira já utiliza o CDR *in natura* como parcela de fonte alternativa de combustível para a redução da emissão de CO₂. O objetivo foi investigar a produção de misturas, por meio de aglutinação e/ou extrusão do CDR com palha de cana-de-açúcar e do CDR com casca de eucalipto para otimizar seus aproveitamentos energéticos. Foram produzidos por meio do processo de extrusão sete tratamentos do tipo *flakes* (grânulos de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos): T1 (100% CDR), T2 (90% CDR e 10% casca), T3 (75% CDR e 25% casca), T4 (50% CDR e 50% casca), T5 (90% CDR e 10% palha), T6 (75% CDR e 25% palha) e T7 (50% CDR e 50% palha) e seis tratamentos do tipo pedaços (material compactado de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos), seguindo as mesmas proporções (de T2 a T7). Os resultados mostraram que a densidade do tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) foi, aproximadamente, 10 vezes maior que CDR (*in natura*). A umidade do tratamento *flakes* (CDR com casca), comparada à casca, alcançou uma redução de 83%. O poder calorífico superior (PCS) do tratamento (CDR com casca) foi 30% superior à casca. Os resultados indicaram a possibilidade real de produção de misturas entre CDR e biomassas, via processo de extrusão. O resultado é um combustível sólido de melhor qualidade: mais homogêneo, menor umidade, maior PCS e maior facilidade para estoque e manuseio.

Palavras-chave: Biomassas. Cimenteira. Extrusão. *Flakes*. Pedaços. Misturas. Polímeros.

ABSTRACT

GUNDIM, R.S. **Application of Refuse Derived Fuel (RDF) to optimize the use of sugarcane straw and eucalyptus bark as a source of thermal energy.** 2022. 159f. Thesis (Doctorate in Planning and Use of Renewable Resources) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2022.

Refuse derived fuel (RDF), characterized as part of municipal solid waste (MSW), is the leftover from the recycling process of waste not yet disposed of in landfills. The cement industry already uses RDF in natura as part of an alternative source of fuel to reduce CO₂ emissions. The objective was to investigate the production of mixtures, through agglutination and/or extrusion of RDF with sugarcane straw and RDF with eucalyptus bark to optimize their energy use. Seven flakes-type treatments were produced through the extrusion process (granules of mixtures of RDF with undefined biomasses and formats): T1 (100% RDF), T2 (90% RDF and 10% bark), T3 (75% RDF and 25% bark), T4 (50% RDF and 50% bark), T5 (90% RDF and 10% straw), T6 (75% RDF and 25% straw) and T7 (50% RDF and 50% straw) and six pieces-like treatments (compacted material from mixtures of RDF with undefined biomass and formats), following the same proportions (from T2 to T7). The results showed that the density of the treatment produced in flakes format (RDF with straw) was approximately 10 times greater than RDF (in natura). The moisture of the flakes treatment (RDF with bark), compared to the bark, achieved a reduction of 83%. The higher heating value (HHV) of the treatment (RDF with bark) was 30% higher than the bark. The results indicated the real possibility of producing mixtures between RDF and biomass, by extrusion process. The result is a better quality solid fuel: more homogeneous, lower humidity, higher HHV and easier storage and handling.

Keywords: Biomasses. Cement plants. Extrusion. Flakes. Pieces. Mixtures. Polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Distribuição entre a oferta e a demanda de energia da lenha (em 10 ³ t), em 2019	28
Figura 2 -	Distribuição entre a oferta e a demanda do consumo final de energia da lenha (em 10 ³ t), em 2019	29
Figura 3 -	Distribuição entre a oferta e a demanda do consumo industrial de energia da lenha (em 10 ³ t), em 2019	29
Figura 4 -	Distribuição entre a oferta e a demanda da transformação de energia da lenha (em 10 ³ t), em 2019	30
Figura 5 -	Área colhida e de plantio de cana do setor sucroenergético (Brasil).	32
Figura 6 -	Diagrama de cogeração de energia a partir dos resíduos da cana de açúcar como biocombustíveis	34
Figura 7 -	Linha de processamento de resíduos sólidos.	37
Figura 8 -	Resumo dos resultados encontrados no processamento e produção de CDR na literatura	38
Figura 9 -	Histórico global da emissão de CO ₂ por tonelada de cimento, em 2019.	41
Figura 10 -	Projeção da utilização dos Combustíveis Alternativos na produção de cimento no Brasil (2014 a 2050)	42
Figura 11 -	Taxa de substituição térmica (TSR em%) de combustíveis fósseis pelo uso de CDR na indústria de cimento em países selecionados, Membros da União Europeia (UE) 28 e em todo o mundo (1990 a 2016)	43
Figura 12 -	Caldeira de terceira geração para queima de CDR	45
Figura 13 -	Caldeira de leito fluidizado borbulhante (em inglês, <i>Bubbling Fluidized Bed</i> - BFB)	47
Figura 14 -	Efeitos danosos em caldeiras	48
Figura 15 -	Distribuição em % do material plástico consumido em 2020	51
Figura 16 -	Representação esquemática de um aglutinador	53
Figura 17 -	Hélices dentro da cuba cilíndrica do aglutinador de filmes plásticos	53
Figura 18 -	Máquina de extrusão tipo parafuso com aquecedor na matriz	54
Figura 19 -	Vista de cima da localização do galpão da Salmeron Sorocaba-SP	64
Figura 20 -	CDR manejado em dia de coleta na empresa Salmeron	65

Figura 21 -	Momento de retirada da coleta de CDR na empresa Salmeron	66
Figura 22 -	Bandejas com amostras de CDR de uma das coletas	67
Figura 23 -	Bandejas com amostras de CDR de uma das coletas na estufa para secagem (SL-102/27, SOLAB)	67
Figura 24 -	Triturador utilizado na moagem dos materiais testados (TM-05, Lippel)	68
Figura 25 -	Agitador orbital (MA 750, Marconi), com quatro peneiras (1/4 a 20 mesh, em ordem crescente) (Bertel)	69
Figura 26 -	Determinação da massa do recipiente com amostra (g) em balança semi-analítica (BL3200H, Shimadzu)	70
Figura 27 -	Forno tipo mufla (LF00212, JUNG), usado na produção das cinzas	71
Figura 28 -	Microscópio eletrônico de varredura (TM 3000, Hitachi) usado nas análises de MEV/EDS	73
Figura 29 -	Calorímetro usado na análise de poder calorífico superior (C200, IKA)	74
Figura 30 -	TGA (Pyris1, Perkin Elmer) utilizado nas análises termogravimétricas	75
Figura 31 -	Amostra (CDR 5) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra A)	84
Figura 32 -	Amostra (CDR 2) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra B)	84
Figura 33 -	Amostra (CDR 9) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra C)	85
Figura 34 -	Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR (Amostra A)	86
Figura 35 -	Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR (Amostra B)	86
Figura 36 -	Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR	87
Figura 37 -	Gráfico realizado a partir dos valores médios obtidos das cinzas do CDR (coletadas em 10 diferentes dias) por meio do EDS	88
Figura 38 -	Curvas de TG das 10 amostras de CDR (coletadas em dias diferentes) em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min ⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min ⁻¹	89
Figura 39 -	Curvas de DTG de 10 amostras de CDR (coletadas em dias diferentes) em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min ⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min ⁻¹	90

Figura 40 -	Cinzas da casca de eucalipto (A) e palha de cana (B), medidas em Sorocaba, em 2020	109
Figura 41 -	Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas da casca de eucalipto (Amostra A)	110
Figura 42 -	Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas da palha de cana-de-açúcar (Amostra B)	110
Figura 43 -	Curvas de TG de amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml.min ⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min ⁻¹	112
Figura 44 -	Curvas de DTG de amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min ⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min ⁻¹	113
Figura 45 -	Estufa com renovação e circulação de ar utilizado na pré-secagem dos materiais testados (Luca-82/40, Lucadema)	123
Figura 46 -	Objetos segregados anterior ao processo de moagem (vidro, pedaços de cabo de aço, pedras, parafusos, latas, etc.)	123
Figura 47 -	Triturador utilizado na moagem dos materiais testados (P1004, Primotécnica)	124
Figura 48 -	Misturador utilizado nos testes para aglutinação do CDR (Mix.15.AX, AX Plásticos)	125
Figura 49 -	Aglutinador (AS500, Seibt), utilizado nos testes com CDR	126
Figura 50 -	Tratamento T1.1 com 100 % de CDR <i>in natura</i> segregado e seco	126
Figura 51 -	Teste no aglutinador (A) do tratamento T1.1, 100 % de CDR <i>in natura</i> , segregado e seco e monitoramento da temperatura por termômetro digital (B)	127
Figura 52 -	Preparação das amostras de CDR e das misturas com as biomassas em caixa plástica de 180 litros	128
Figura 53 -	Máquina de extrusão tipo monorosca parafuso com aquecedor na matriz (D.60X25D, Miotto) com capacidade de produção de 50 kgh ⁻¹ , utilizado no processo de compactação dos materiais testados	129
Figura 54 -	Balança determinadora de umidade (ID 200, Marconi) utilizada na determinação da umidade das biomassas e misturas de CDR e biomassas em formatos de <i>flakes</i>	131
Figura 55 -	Resultados do processo de aglutinação com a não formação de <i>flakes</i> realizados no aglutinador (AS500, Seibt), utilizado nos testes com CDR	134

Figura 56 -	Tratamentos em formatos de flakes e em pedaços de CDR 100 % e de misturas de CDR com casca de eucalipto, produzidos por meio do processo de extrusão	136
Figura 57 -	Tratamentos em formatos de flakes e em pedaços de CDR 100 % e de misturas de CDR com palha de cana-de-açúcar, produzidos por meio do processo de extrusão	137
Figura 58 -	Moinho de baixa velocidade (MP 20, Meysi, Brasil) utilizado na produção das misturas em formato de <i>flakes</i> 100% CDR e entre CDR e biomassas por meio de processo de extrusão	138
Figura 59 -	Resultados do processo de extrusão de pedaços das misturas entre CDR com palha de cana-de-açúcar (A) e CDR com casca de eucalipto (B) realizados na extrusora monorosca (D.60X25D, Miotto)	142
Figura 60 -	Comparativo entre médias das densidades a granel dos tratamentos (kg m^{-3})	143
Figura 61 -	Comparativo entre médias das umidades dos tratamentos (%)	145
Figura 62 -	Comparativo entre valores médios de PCS dos tratamentos (J g^{-1})	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Frequência de coleta das amostras de CDR	65
Tabela 2 -	Coleta de amostras extras de CDR	65
Tabela 3 -	Classificação granulométrica média das amostras de CDR (1 a 10) <i>in natura</i> (trituradas), medidas em 2021	76
Tabela 4 -	Classificação granulométrica média das amostras extras de CDR (11 e 12) <i>in natura</i> (sem trituração)	76
Tabela 5 -	Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR <i>in natura</i> e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)	77
Tabela 6 -	Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR trituradas e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)	77
Tabela 7 -	Valores médios para a umidade (base seca) (%) das amostras de CDR e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)	79
Tabela 8 -	Análise imediata das amostras de CDR (coletadas em 10 diferentes dias)	80
Tabela 9 -	Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras de CDR triturado e seco (coletadas em 10 diferentes dias)	82
Tabela 10 -	Valores das temperaturas obtidas a partir da análise termogravimétrica das amostras de CDR (coletadas em 10 diferentes dias)	91
Tabela 11 -	Valores médios para classificação granulométrica (%) das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar e seus respectivos desvios-padrão	104
Tabela 12 -	Valores médios para a densidade a granel da palha de cana e casca de eucalipto e seus respectivos desvios-padrão	104
Tabela 13 -	Valores médios para a umidade (base seca) (%) das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar e seus respectivos desvios-padrão	106
Tabela 14 -	Análise imediata (média aritmética e desvios padrão das triplicatas) das amostras das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar	106
Tabela 15 -	Valores médios para o Poder Calorífico Superior da palha de cana-de-açúcar e casca de eucalipto e seus respectivos desvios-padrão	108
Tabela 16 -	Elementos e porcentagem média encontrados nos materiais de biomassa de casca de eucalipto e palha de cana via EDS	111

Tabela 17 -	Valores das temperaturas obtidas a partir da análise termogravimétrica das amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar	114
Tabela 18 -	Definição dos formatos da produção das misturas 100% CDR e entre CDR e biomassas por meio de processo de extrusão	135
Tabela 19 -	Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de <i>flakes</i> de 100 % CDR e misturas de CDR com casca de eucalipto	138
Tabela 20 -	Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de <i>flakes</i> de 100 % CDR e misturas de CDR com palha de cana-de-açúcar,	139
Tabela 21 -	Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de pedaços de misturas de CDR com casca e CDR com palha de cana-de-açúcar	139
Tabela 22 -	Valores médios para a densidade a granel dos tratamentos em formato de <i>flakes</i>	140
Tabela 23 -	Valores médios para a densidade a granel dos tratamentos em formato de pedaços	141
Tabela 24 -	Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR <i>in natura</i> , CDR triturado e seco e das biomassas casca de eucalipto e palha de cana trituradas e secas e seus respectivos desvios-padrão	142
Tabela 25 -	Valores médios para a umidade e seus respectivos desvios-padrão dos tratamentos em formato de <i>flakes</i>	145
Tabela 26 -	Análise imediata (média aritmética e desvios padrão das duplicatas) dos tratamentos em formato de <i>flakes</i>	147
Tabela 27 -	Valores médios para o Poder Calorífico Superior dos tratamentos em formato de <i>flakes</i> e seus respectivos desvios-padrão	150
Tabela 28 -	Valores médios para o Poder Calorífico Superior das biomassas casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar anteriores ao processo de extrusão e seus respectivos desvios-padrão	150

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Caracterização do CDR produzido a partir de resíduos municipais (lixão), de aterro sanitário e combinados	39
Quadro 2	Limites para a classificação de RSUE	40
Quadro 3	Identificação dos possíveis dos compartimentos e dos possíveis danos em uma caldeira genérica	48
Quadro 4	Principais tipos de polímeros utilizados no Brasil, suas aplicações, temperaturas de fusão e poder calorífico	50
Quadro 5	Valores de poder calorífico de combustíveis	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABETRE Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes

ABIPLAST Associação Brasileira da Indústria do Plástico

ABREN Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos

ASTM *American Society Testing and Materials*

BEN Balanço Energético Nacional

BFB *Bubbling Fluidized Bed* (Caldeira de leito fluidizado borbulhante)

BOPP Polipropileno bi-orientado (do inglês: *Biaxially oriented polypropylene*)

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CDR Combustível Derivado de Resíduos

CNPEM Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

DTG Termogravimetria Derivada

EPE Empresa de Pesquisa Energética

EPS poliestireno expandido

EDS Espectroscopia por energia dispersiva

EUA Estados Unidos da América

EVA poli[etileno-co-(acetato de vinila)]

GCCA *Global Cement and Concrete Association*

HCL Ácido clorídrico

IBÁ Indústria Brasileira de Árvores

MCTIC Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações

MEV Microscopia eletrônica de varredura

MTB Ministério do trabalho

PCI Poder Calorífico Inferior

PCS Poder Calorífico Superior

PE Polietileno

PEAD Polietileno de alta densidade
PEBD Polietileno de baixa densidade
PELBD Polietileno linear de baixa densidade
PET poli(tereftalato de etileno)
Planares Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PP Polipropileno
PS Poliestireno
PVC Poli(cloreto de vinila)
RPM Rotações por minuto
RSU Resíduo Sólido Urbano
RSUE Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos
SIMA Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente
SIN Sistema Interligado Nacional
Sinir Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIC Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
T degrad Temperatura de degradação
TG Termogravimetria (do inglês: *termogravimetric*)
TGA Análise termogravimétrica (do inglês: *termogravimetric analysis*)
TSR Taxa de substituição térmica (do inglês: *thermal substitution rate*)
UE União Europeia
UNICA União da Indústria de Cana-de-Açúcar
URE Unidade de recuperação energética
XPS Poliestireno extrudado

LISTA DE SÍMBOLOS

Al Alumínio

Ar Argônio

C Carbono

Ca Cálcio

CaCl₂ Cloreto de Cálcio

Cl Cloro

CO₂ Dióxido de Carbono

CoCl₂ Cloreto de cobalto

F Flúor

Fe Ferro

FeCl₂ Cloreto de Ferro

HCL Ácido clorídrico

J g⁻¹ Joule/grama

K Potássio

kg m⁻³ Quilograma por metro cúbico

k J g⁻¹ Quilojoule por grama

Mg Magnésio

MJ kg⁻¹ Mega Joule por quilograma

MgCl₂ Cloreto de magnésio

MW Mega Watt

N₂ Nitrogênio molecular

TWh Tera Watt hora

Na Sódio

O Oxigênio

P Fósforo

S Enxofre

Si Silício

ton ha⁻¹ tonelada por hectare

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	24
1.1. Objetivos gerais e específicos	26
Capítulo 2: Revisão bibliográfica	27
2.1. Resíduo sólido urbano (RSU) e biomassa	27
2.2. Biomassa do eucalipto	28
2.2.1. Oferta e demanda	28
2.2.2. Casca do eucalipto	30
2.2.3. Composição da casca do eucalipto	31
2.3. Biomassa da palha de cana	32
2.4. Combustível derivado de resíduos (CDR)	36
2.4.1. Legislação brasileira para o uso de CDR	39
2.4.2. Aplicação do CDR nas indústrias cimenteiras	41
2.4.3. Caldeiras e os efeitos danosos causados pelo uso do CDR e de biomassas	43
2.4.4. Misturas entre CDR e biomassas como combustível sólido	49
2.5. Compósitos de polímeros e biomassas	49
2.5.1. Processo de aglutinação de filmes plásticos	52
2.5.2. Processo de compactação por extrusão	54
2.6. Referências	55
Capítulo 3: Caracterização do CDR para a produção de misturas com biomassas	61
3.1. Introdução	63
3.2. Material e métodos	64
3.2.1. Material	64
3.2.2. Coleta das amostras	64
3.2.3. Preparação das amostras	66
3.2.4. Granulometria	68
3.2.5. Densidade a granel	69
3.2.6. Umidade	70
3.2.7. Análise imediata	71

3.2.7.1.	Teor de voláteis	71
3.2.7.2.	Teor de cinzas	72
3.2.7.3.	Teor de carbono fixo	73
3.2.8.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / Espectroscopia eletrônica de varredura (EDS)	73
3.2.9.	Poder calorífico superior (PCS)	74
3.2.10.	Análises termogravimétricas (TGA)	74
3.2.11.	Análise estatística	75
3.3.	Resultados e discussão	75
3.3.1.	Granulometria	75
3.3.2.	Densidade a granel	77
3.3.3.	Umidade	79
3.3.4.	Análise imediata	80
3.3.5.	Poder calorífico superior (PCS)	82
3.3.6.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / Espectroscopia eletrônica de varredura (EDS)	83
3.3.7.	Análises termogravimétricas (TGA)	89
3.4.	Conclusão	92
3.5	Referências	93
Capítulo 4: Caracterização das biomassas de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar		96
4.1.	Introdução	98
4.2.	Material e métodos	98
4.2.1.	Material	98
4.2.2.	Preparação das amostras	99
4.2.3.	Granulometria	99
4.2.4.	Densidade a granel	99
4.2.5.	Umidade	100
4.2.6.	Análise imediata	100
4.2.6.1.	Teor de voláteis	100
4.2.6.2.	Teor de cinzas	101

4.2.6.3.	Teor de carbono fixo	101
4.2.7.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / Espectroscopia eletrônica de varredura (EDS)	102
4.2.8.	Poder calorífico superior (PCS)	102
4.2.9.	Análises termogravimétricas (TGA)	103
4.2.10.	Processamento e análise dos dados	103
4.2.11.	Análise Estatística	103
4.3.	Resultados e discussão	103
4.3.1.	Granulometria	103
4.3.2.	Densidade a granel	104
4.3.3.	Umidade	105
4.3.4.	Análise imediata	106
4.3.5.	Poder calorífico superior (PCS)	108
4.3.6.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / Espectroscopia eletrônica de varredura (EDS)	109
4.3.7.	Análise termogravimétrica (TGA)	112
4.4.	Conclusão	114
4.5	Referências	115
Capítulo 5: Produção das misturas de CDR com as biomassas casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar		119
5.1.	Introdução	121
5.2.	Material e métodos	122
5.2.1.	Material	122
5.2.2.	Preparação das amostras	122
5.2.3.	Processo de aglutinação	124
5.2.4.	Processo de extrusão	127
5.2.5.	Granulometria	130
5.2.6.	Densidade a granel	130
5.2.7.	Umidade	130
5.2.8.	Análise imediata	131
5.2.8.1.	Teor de voláteis	131

5.2.8.2.	Teor de cinzas	132
5.2.8.3.	Tor de carbono fixo	132
5.2.9.	Poder calorífico superior (PCS)	132
5.2.10.	Análise estatística	133
5.3.	Resultados e discussão	133
5.3.1.	Granulometria	134
5.3.2.	Densidade a granel	140
5.3.3.	Umidade	144
5.3.4.	Análise imediata	147
5.3.5.	Poder calorífico superior (PCS)	149
5.4.	Conclusão	152
5.5	Referências	153
Capítulo 6: Considerações finais		158

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios ambientais da humanidade está associado ao tratamento e à disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). O crescimento populacional das cidades leva a um aumento do consumo e da quantidade das diversidades do RSU (MARSIGLIA, 2019). A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, agrícolas e industriais, por meio do tratamento térmico, pode ser considerada uma alternativa, a fim de mitigar esses problemas ambientais.

O combustível derivado de resíduos (CDR), caracterizado como parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é a sobra do processo de reciclagem de resíduos ainda não descartados em aterros.

Na Letônia, cerca de 30 % do RSU, tem potencial para ser utilizado na coprodução de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), mas de acordo com os requisitos da União Europeia (UE) para a reciclagem de resíduos de RSU, bem como as restrições de aterro, o potencial para a produção de CDR é de 20-25 % (ÂRIÑA et al., 2020).

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN, 2022), atualmente há trinta e oito indústrias habilitadas para utilização do CDR, mas esse número pode crescer impulsionado pelo Decreto Presidencial nº 10.936 de janeiro de 2022, o qual institui o Programa Nacional de Logística Reversa. A ABREN afirma ainda que o decreto representa uma importante contribuição para o desenvolvimento potencial de produção de CDR no país, estimado em 20 milhões ton ano⁻¹, dez vezes maior que a produção vigente, cerca de 2 milhões ton ano⁻¹.

Assim, encontrar alternativas para ampliar a recuperação energética de materiais residuais, como o CDR, cuja natureza é composta, predominantemente, por polímeros e, conseqüentemente, alto poder calorífico, reforça a hipótese de que tal ação possa ser aliada na redução de resíduos, e também na permanente necessidade de geração de energia.

Entretanto, a presença de elementos químicos, tais como o Cloro (Cl), Flúor (F), Cálcio (Ca) e o Sódio (Na) no CDR, pode causar deposição e, conseqüente corrosão no interior da caldeira. Além disso, elementos como Potássio (K) e Sódio (Na), quando não são devidamente quantificados e qualificados e são adicionados sem controle, podem formar aglomerados. Neste caso, se não houver uma ação corretora, poderá ocorrer uma sinterização das cinzas do CDR (resíduos da combustão) sobre a grelha (SAMPAIO, 2014).

Por outro lado, temos a clássica alternativa energética, a qual trata-se da utilização de biomassas para geração de energia, como o bagaço da cana-de-açúcar, o capim elefante, cavacos de eucalipto entre outros (AREIAS, 2020; GOLDEMBERG, 2017).

Segundo Pincelli, Moura e Brito (2017), a utilização da casca de eucalipto para fins energéticos é extremamente importante e viável, principalmente devido a sua abundância, facilidade quanto às estimativas de previsão e controle de sua produção e, ainda, seu baixo custo. Ainda, os autores concluíram que a proporção de resíduos lenhosos com potencial energético representou 75% do total de resíduos gerados.

Outra biomassa também abundante no Brasil é a palha de cana-de-açúcar. Segundo a Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a área total colhida e produzida do setor sucroenergético brasileiro foi de 8,6 milhões de hectares, na safra 2020-2021, com incremento de 2,1% em relação à safra anterior (COSTA, A. O. da, et al., 2021; CONAB, 2021a; CONAB, 2021b). Cervi et al. (2019) afirmaram, ainda, o grande potencial energético existente sobre a palha de cana-de-açúcar.

Peters et al. (2020) embasados na hipótese de que a co-combustão entre biomassas e CDR em usinas existentes de alta eficiência seriam uma solução para mitigar as mudanças climáticas, experimentaram três composições de biomassas com CDR. Em outro estudo, Kerdsuwan, Meenaroch e Chalermcharoenrat (2016) alcançaram melhorias na eficiência do CDR a ser utilizado em tratamento térmico para a produção de energia verde, limpa de forma eficaz e sustentável, ao utilizarem um dispositivo de prensagem de pistão com um sistema de aquecimento implementado.

A organização do trabalho foi dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo mostra a introdução para o contextualizar a temática do trabalho e apresenta seus objetivos. O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica para o embasamento dos temas tratados. O capítulo três apresenta uma caracterização do CDR: suas propriedades físicas e energéticas. O capítulo quatro abrange as caracterizações das fontes de biomassa (casca de eucalipto e palha de cana), assim como as suas propriedades físicas e energéticas. O capítulo cinco discorre sobre os testes realizados para a formação de misturas, por meio de processo de aglutinação e da extrusão entre o CDR e a palha de cana e o CDR e a casca de eucalipto e suas possibilidades de uso. O capítulo seis reúne as considerações finais.

1.1. Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral foi produzir um combustível sólido de qualidade utilizando misturas entre o CDR e as biomassas: casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar.

Os objetivos específicos foram:

- Realizar a caracterização das biomassas: casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar; e do CDR;
- Apresentar os testes e os tratamentos realizados, por meio de processo de extrusão das misturas entre frações de CDR e casca de eucalipto, e de frações de CDR e palha de cana-de-açúcar.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduo sólido urbano (RSU)

De acordo com o relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), o Brasil tem registrado crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), e em comparação a 2010, houve aumento de 18,5% de RSU. Ainda segundo ABRELPE, foi gerado 79,6 milhões de toneladas de RSU, dos quais 59,5% tiveram destinação adequada (aterros sanitários) contra 40,5% que foram dispostos inadequadamente (aterros controlados e lixões). A diferença entre os aterros controlados e os sanitários é de que o primeiro recebe cobertura, sem impermeabilização do solo, ao contrário do segundo (LOPES et al., 2018).

Na última década, apesar de haver sinais de evolução da coleta de RSU, a qual passou de 88% para 92%, pode-se observar que os resíduos ainda geram impactos ambientais, em função do volume produzido e do processo inadequado de descarte de parte dos deles, ou seja, o uso de aterros controlados e lixões. E, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE, 2020), existem, aproximadamente, 2.514 (45,13%) lixões em atividade, ao considerarmos uma totalidade de 5.570 municípios.

Segundo o Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (EPE, 2021a), a oferta interna de energias renováveis no Brasil representou 48,4% da matriz energética: hidrelétrica (12,6%), bagaço de cana-de-açúcar (19,1%), lenha e carvão vegetal (8,9%) e outras renováveis (7,7%). Comparado ao ano de 2019, em 2020, houve aumento de 2,5% das energias renováveis na matriz brasileira.

Uma das alternativas às fontes convencionais e não renováveis de energia é a utilização de biomassas. A biomassa vegetal é composta por matérias orgânicas de origem florestal, agrícola e de poda urbana. Entre as biomassas lignocelulosicas, podem ser citadas: palha e casca de arroz, palha de trigo, palha de sorgo, palha de milho, bagaço e palha da cana, casca de eucalipto, galhos e serragem de madeira, capim, entre outros (AREIAS, 2020).

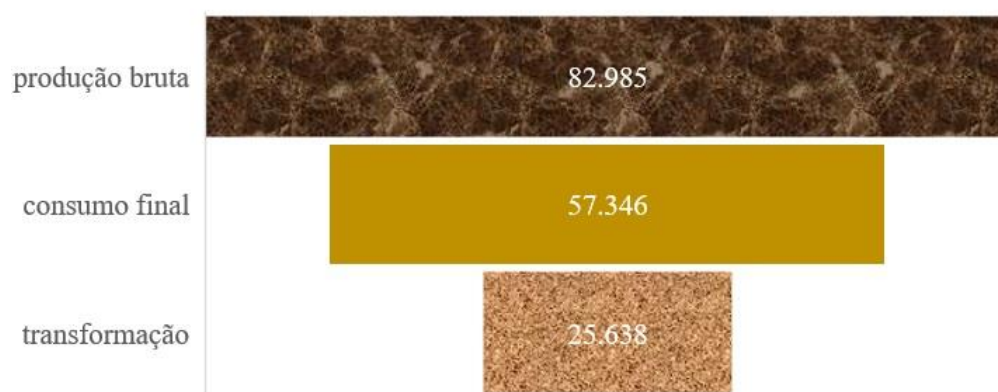
2.2. Biomassa do Eucalipto

2.2.1. Oferta e demanda

No Brasil, segundo o Relatório Anual de 2021, feito pela Indústria Brasileira de Árvores (2021), a área total de árvores plantadas em 2020 foi de, aproximadamente, 9,5 milhões de hectares, na qual 7,5 milhões (ou 78%) é representada pelo cultivo do eucalipto. Comparado à 2020, houve um decréscimo de 1,97% da área plantada de eucalipto (IBÁ, 2021). De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2019), o eucalipto tem diversas finalidades: energia, celulose e papel, laminação, serraria, entre outras.

O eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é uma espécie vegetal com crescimento considerado rápido e plenamente adaptada às condições climáticas brasileiras, conforme o Plano Nacional de Energia 2030 do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2007). Ainda, de acordo com o IBÁ (2021), as mudanças climáticas pode ser um dos fatores que fez com que a produtividade média do eucalipto no Brasil tenha reduzido de $38,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em 2019, para $36,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em 2020. O Balanço Energético Interativo (EPE, 2021b), apresenta o cenário entre a oferta e a demanda da utilização da lenha de eucalipto no Brasil, em 2019 (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição entre a oferta e a demanda de energia da lenha (em 10^3 t), em 2019

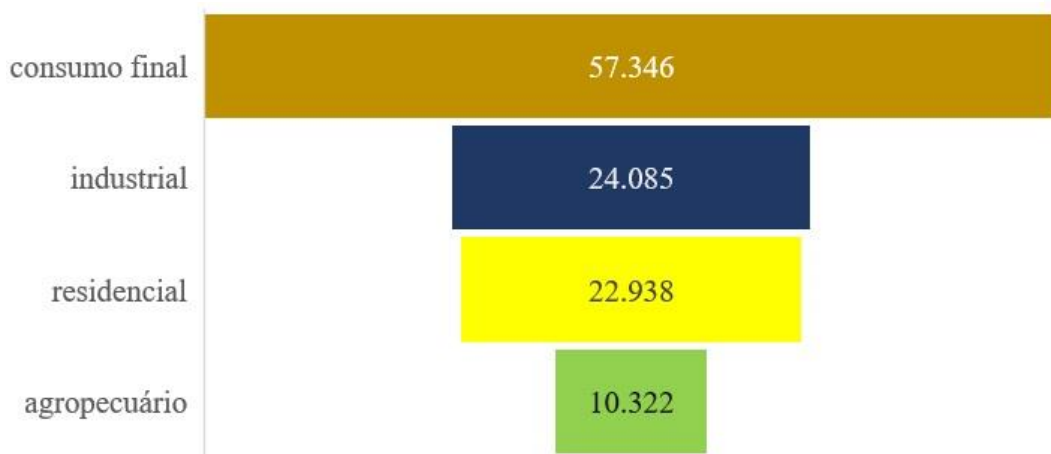


Fonte: Adaptado de EPE, 2021.

Houve uma produção bruta de $82.985 \cdot 10^3 \text{ t}$ (100%) em 2019, que foi distribuída entre o consumo final, de $57.346 \cdot 10^3 \text{ t}$ (69%) e a transformação, de $25.638 \cdot 10^3 \text{ t}$ (31%). O consumo final de lenha, foi de $57.346 \cdot 10^3 \text{ t}$ (100%), distribuído em: industrial (42%), residencial (40%)

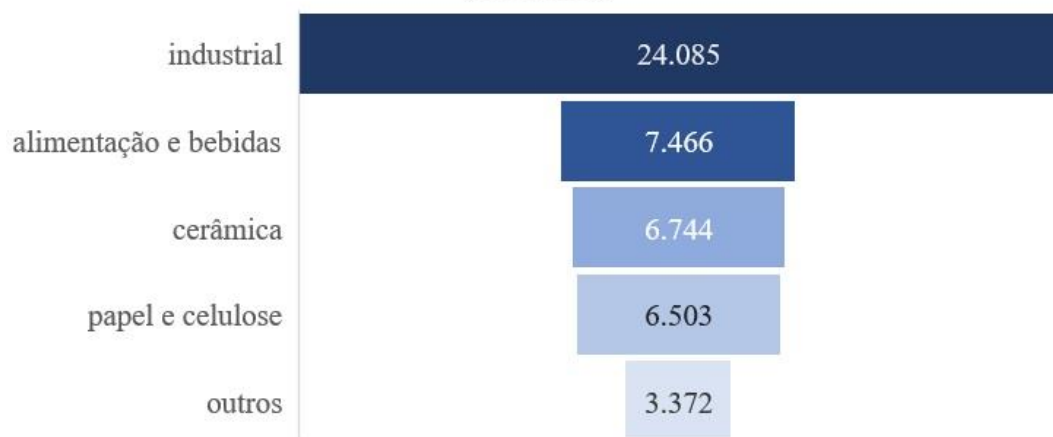
e agropecuário (18%) (Figura 2). Já no consumo industrial, de um total de 24.085 10³ t (100%) foi distribuído em alimentação e bebidas (31%), cerâmica (28%), papel e celulose (27%) e outros (14%) (Figura 3). Quanto à transformação, os 25.638 10³ t (100%), foram divididos em carvão vegetal (94%) e geração elétrica (6%) (Figura 4).

Figura 2 - Distribuição entre a oferta e a demanda do consumo final de energia da lenha (em 10³ t), em 2019



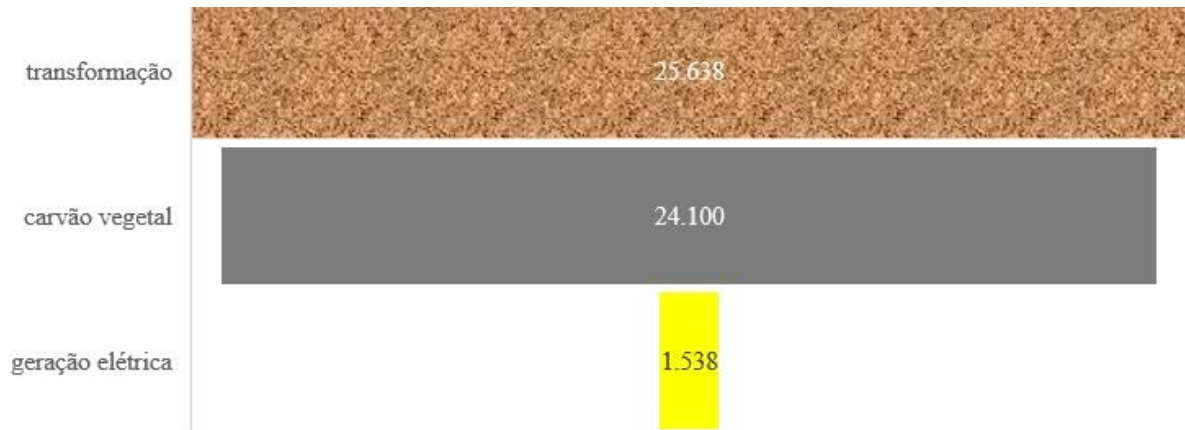
Fonte: Adaptado de EPE, 2021.

Figura 3 - Distribuição entre a oferta e a demanda do consumo industrial de energia da lenha (em 10³ t), em 2019



Fonte: Adaptado da EPE, 2021.

Figura 4 - Distribuição entre a oferta e a demanda da transformação de energia da lenha (em 10³ t), em 2019



Fonte: Adaptado da EPE, 2021.

2.2.2. Casca do eucalipto

A cobertura exterior de toda árvore desde a raiz até o tronco e os ramos é o que define a casca (FOELKEL, 2010). Existem muitos tipos de cascas de eucalipto, as mais comuns das espécies: *E. grandis*, *E. saligna*, *E. viminalis*, *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. benthamii*, *E. urophylla*, entre outras (FOELKEL, 2010; EMBRAPA, 2021; SETTE JR. et al., 2018). A quantidade de cascas nas árvores depende de muitos fatores, como o tipo de casca e do seu estágio genético (FOELKEL, 2010). De acordo com Neiva et al. (2018), a casca representa 18,3% do total de um indivíduo (NEIVA et al., 2018).

Conforme Foelkel (2010), os troncos comerciais das espécies de eucalipto de reflorestamento possuem entre 10 a 18% de casca em relação ao seu volume. No entanto, ele também afirma que existem diferenças percentuais entre a quantidade de cascas em cada indivíduo e que estas não são tão grandes e variam entre 8 e 12%, nas regiões com menos casca, e 20 a 25% nas partes com maior teor de casca (FOELKEL, 2010).

Ainda, Foelkel (2010) considera que a casca de eucalipto, rica em nutrientes e carbono, pode ser utilizado como combustível.

A casca, em geral, contém uma fração de extrativos e de lignina (até 50%, em base seca), que pode ser utilizada como fonte renovável de produtos químicos. Assim, as rotas tecnológicas da casca de eucalipto incluem sua utilização em painéis de madeira, de retirada de extrativos (principalmente taninos) e de sua aplicação em resinas e materiais espumosos, bem como

também, via tecnologias termoquímicas, da liquefação direta em álcoois e de pirólise (FENG et al., 2013).

2.2.3. Composição da casca do eucalipto

De acordo com Feng et al. (2013), a casca do eucalipto é dividida em duas partes: interna e externa. A casca interna é composta, principalmente, de floema, tecido vascular responsável por conduzir substâncias orgânicas; e a casca externa, parte morta da casca, formada pela periderme (tecido de proteção). Apesar das diferenças entre elas, sua separação, na prática, é insignificante, pois são comumente utilizadas juntas, como casca inteira (FENG et al., 2013).

As cascas se diferenciam, quimicamente, da madeira, principalmente devido aos teores de extrativos e de minerais (FOELKEL, 2010). Apesar das diversas aplicações da casca de eucalipto, seja como matéria-prima em biorrefinarias, ou como painéis de isolamento térmico, ou ainda, na indústria farmacêutica e na indústria alimentícia, uma das aplicações ainda mais comuns é na produção de energia, em especial, nas próprias empresas de fabricação de papel e celulose (FOELKEL, 2010).

Segundo o Relatório Anual 2021 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2021), em 2020 no Brasil, a maior parte da destinação de resíduos, entre eles, cascas, galhos, cavacos, serragem e licor preto da fábrica e da área florestal, foi para geração de energia, cerca de 57,2% (IBÁ, 2021).

No entanto, o teor de cinzas presente nas cascas caracteriza desvantagem, pois sua incineração direta pode causar sinterização e conseqüente incrustação na grelha da caldeira podendo levar à danos (FOELKEL, 2010; SAMPAIO, 2014).

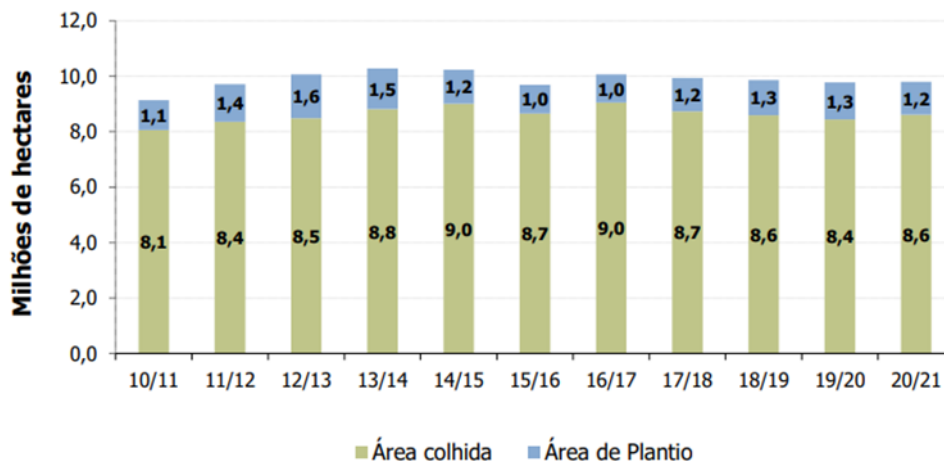
Além disso, outras características que reduzem a eficiência da utilização das cascas de eucalipto na produção de energia de forma direta são: natureza higroscópica, volumes e dimensões variados, baixa densidade de massa e energia e alto teor de umidade, (60 – 70%) para o indivíduo recém abatido. (SETTE JR et al., 2018; FOELKEL, 2010).

Chrisostomo (2011) afirma que tais características, dificultam a utilização destes materiais como combustível, mas indicam que a sua compactação sob a forma de biocombustível sólido (briquetes) pode melhorar a qualidade do combustível sólido obtido.

2.3. Biomassa da palha de cana

Segundo a Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (COSTA, A. O. da, et al., 2021), por meio da publicação “Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis - Ano 2020”, a área total colhida da produção brasileira do setor sucroenergético foi de 8,6 milhões de hectares na safra compreendida entre 2020 e 2021, exibindo um aumento de 2,1 % em relação à safra anterior, com a região Sudeste responsável pelo maior contribuição nesse incremento (3,4%), segundo o Boletim de Safra de Cana de Açúcar publicado pelo portal da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021a; CONAB, 2021b). A Nota Técnica aponta, ainda, que a área de plantio de 1,2 milhões de hectares sofreu redução de 11,6% em relação à safra anterior, em que a região Centro-Oeste teve maior impacto, com uma redução de 23,8%, devido à preferência pelo cultivo de grãos (COSTA et al., 2021) (Figura 5).

Figura 5 – Área colhida e de plantio de cana do setor sucroenergético (Brasil)



Fonte: COSTA et al., 2021.

Conforme o Plano Nacional de Energia 2030 do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2007), a principal biomassa residual da produção industrial de açúcar e etanol é o bagaço de cana-de-açúcar. Trata-se de um material constituído por fibras celulósicas moídas.

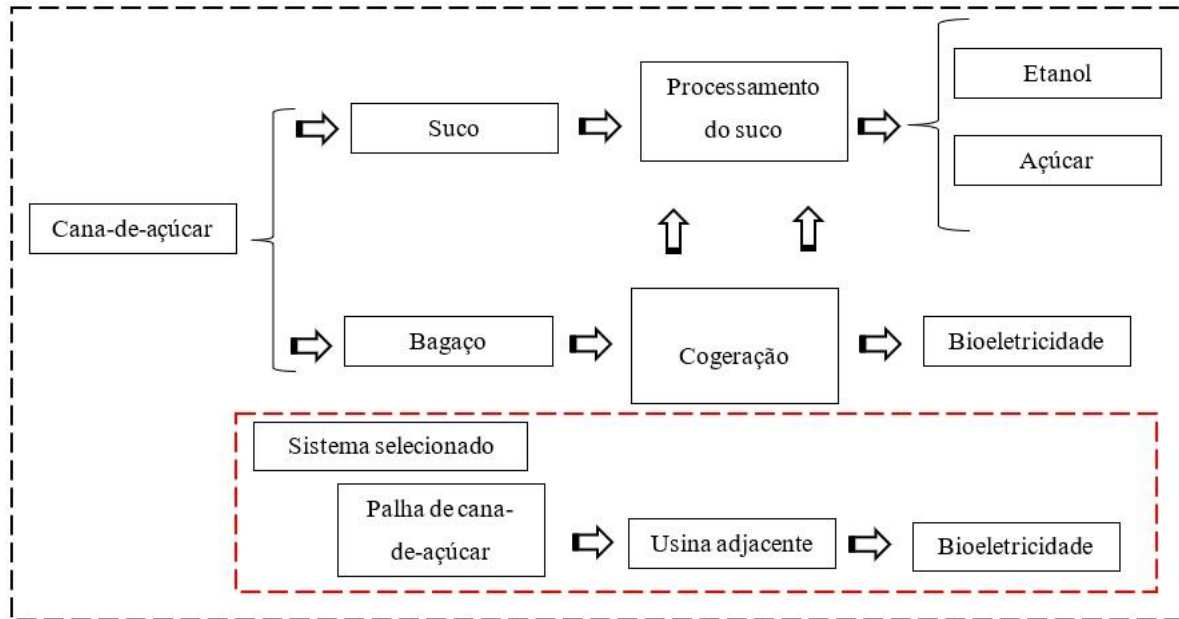
De acordo com o relatório “Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil” (CONAB, 2019), além de ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o Brasil tornou-se praticamente autossustentável energeticamente e em alguns casos, comercializa o excedente da eletricidade gerada a partir deste material.

De acordo com o “Relatório de Acompanhamento da Safra Brasileira da Cana-de-açúcar - Safra 2019/20”, a colheita mecanizada está cada vez mais presente no Brasil, representando

91,8 % (CONAB, 2020). Na colheita mecanizada, não há a queima, e as folhas, bainhas, ponteiros, além de pedaços variados de colmo, são cortados, triturados e lançados no solo, formando a palha. A palha, portanto, é um subproduto da indústria da cana, assim como o bagaço. Ainda, é considerada um resíduo. Segundo Cervi et al. (2019), a palha da cana-de-açúcar é formada pela porção foliar do fruto, compreendido por caules e biomassa enterrada, num conjunto composto por copas de folhagem verde e folhas secas ao redor da planta, com alto teor de umidade (11 a 68 %). Justamente, devido ao teor de umidade e de nutrientes que a palha apresenta, deve-se estimular a prática de serviços ambientais, com o objetivo de melhorar a renovabilidade do solo, recomenda-se que as pontas do fruto e as folhas verdes sejam deixados no campo, a fim de promover o acúmulo de carbono no solo e a disponibilidade de água, devido à menor evapotranspiração, a reciclagem de nutrientes e o estímulo ao crescimento das plantas. Hassuani et al. (2005) afirmam que $7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha (base seca) deve ser deixada no campo para o controle de ervas daninhas e pragas.

Entretanto, Cervi et al. (2019) afirmam ainda haver grande potencial energético quanto ao aproveitamento da palha (Figura 6). Diante disso, é necessária a compreensão da porção de material que deve ser deixada no campo e a porção que pode ser aproveitada para a geração de bioenergia torna-se importante.

Figura 6 - Diagrama de cogeração de energia a partir dos resíduos da cana de açúcar como biocombustíveis



Fonte: Adaptado de CERVI et al., 2019.

Dependendo da densidade do canavial, Cervi et al. (2019) afirmam que, em seus estudos, a taxa de remoção da palha alcançou em torno de 44 %, enquanto que, na moenda, ficou em torno dos 50 %. Já Hassuani et al. (2005) observaram que a produtividade média da palha é de 14,4 ton ha⁻¹.

Há, todavia, questões relacionadas às impurezas contidas na palha, bem como a baixa densidade (cerca de 70 a 120 kg m⁻³) (SOARES et al., 2019).

Chrisostomo (2011) afirma que tais características, dificultam a utilização destes materiais como combustível, mas indicam que a sua compactação sob a forma de biocombustível sólido (briquetes) pode melhorar a qualidade do combustível sólido obtido.

A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2021), aponta, em sua *webpage*, que o Brasil tem potencial técnico para produzir 148 TWh de bioeletricidade, caso aproveitasse de forma plena a biomassa presente em seus canaviais, o que representaria atender, aproximadamente, 30 % do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ainda segundo a UNICA (2021), a bioeletricidade tem potencial de crescimento no Brasil para mais de 55 % até 2030. A projeção da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) é de que o potencial técnico de geração de energia a partir das biomassas (palhas e pontas de cana-de-açúcar) irá para 11,2 GW médios, devido ao aumento gradativo da colheita mecanizada, e que as áreas de colheita de cana devem passar de 8,4 milhões de hectares (2020) para 9,7 milhões, em 2030, ao projetarem um aumento de 15 % ao fim do decênio.

Em 2020, foram gerados, pela bioeletricidade da cana 22,6 GWh, o que representa 82 % de toda geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil (UNICA, 2021).

Nielsen et al. (2000), afirmam que tradicionalmente, as caldeiras movidas a biomassa não experimentam grandes problemas com corrosão em alta temperatura, principalmente se a temperatura do metal do tubo do superaquecedor for mantida dentro dos limites, conforme o tipo de material utilizado. No entanto, o desejo de aumentar a temperatura da caldeira, a fim de melhorar a eficiência elétrica das usinas de biomassa, trouxe problemas potenciais de corrosão, em altas temperaturas. A corrosão dos tubos do superaquecedor está relacionada ao material do tubo, bem como à composição química dos depósitos formados nos tubos. Em particular, altos teores de potássio e cloro nos depósitos, formados durante a combustão de palhas e gramíneas, são elementos potencialmente nocivos, no que diz respeito à corrosão das superfícies de transferência de calor.

O mesmo estudo aponta, ainda, que a maioria dos combustíveis de biomassa tem concentrações de enxofre relativamente baixas, em comparação com o carvão, mas com alto teor de metais alcalinos e cloro. O potássio é liberado na fase gasosa, durante a combustão, principalmente como cloreto de potássio e hidróxido de potássio. Assim, quando o gás de combustão passa pela passagem convectiva de uma caldeira, ele é resfriado e, alguns dos metais alcalinos se condensam nos tubos do trocador de calor. Parte dos metais alcalinos pode se condensar, em partículas de cinza volátil, que, mais tarde, podem impactar os tubos do trocador de calor. Os metais alcalinos podem se condensar como cloretos ou sulfatos. Dessa forma, o metal alcalino de maior preocupação na biomassa é o potássio, que pode causar danos como liberação de voláteis (materiais que evaporam facilmente) na combustão da fornalha, provocar corrosão em altas e baixas temperaturas em diferentes partes da caldeira, entre outros (NIELSEN et al., 2000).

2.4. Combustível derivado de resíduos (CDR)

Enquanto o RSU é conhecido como o resíduo sólido urbano, o CDR, uma classificação do RSU, é o combustível derivado de resíduos. Pode também ser definido como: a sobra do processo de reciclagem de resíduos ainda não descartados em aterros. Em geral, essa sobra do processo de reciclagem de resíduos, tem alto poder calorífico superior (PCS), como por exemplo: plásticos diversos (média de 35.145 J g^{-1}) e papel (31.127 J g^{-1}), conforme Quadros 4 e 5, respectivamente deste trabalho.

Estudos realizados em diversos países, como Reino Unido, Indonésia, Alemanha, Brasil, entre outros, apontam que a produção e a utilização de combustível derivado de resíduos (CDR) é uma alternativa energética não convencional em desenvolvimento, em favor do aproveitamento energético e da economia circular (WIDYATMOKO, 2018; PESSOA, 2020).

Existem empresas no Brasil, que aplicam diferentes técnicas e processos da transformação de RSU em CDR: Salmeron (Sorocaba-SP), Estre (Paulínia-SP), Sutco (Santos-SP), ELBRA (Mafra-SC) e Carbogás (Boa Esperança-MG).

O processamento genérico do CDR compreende as etapas:

- Trituração inicial;
- Tambor rotativo: separação de materiais úmidos e pesados;
- Segregação de metais ferrosos;
- Segregação de metais não ferrosos;
- Trituração secundária;
- Segregação aerodinâmica: separação dos materiais mais leves dos mais pesados;
- Trituração final;

Segundo Bialowiec et al. (2017), embora o tratamento biológico mecânico seja uma alternativa à conversão de RSU em CDR, existem dificuldades a serem superadas. Uma delas é a heterogeneidade do material. Uma alternativa, a fim de melhorar tais parâmetros, apresentada no estudo, foi a utilização da torrefação (secagem severa), processo no qual usualmente se mantém de 15 a 60 minutos em temperaturas entre 200 a 300 °C. Isso reduziu a umidade significativamente de 22,9% para 1,4% e, portanto, aumentou o poder calorífico

inferior (PCI) de 19.600 para 25.300 J g⁻¹, que convertido para (PCS), equivale a um aumento de 33.137 J g⁻¹ para 38.827 J g⁻¹ (BIAŁOWIEC et al., 2017).

Infiesta et al. (2019), em estudo realizado na cidade de Boa Esperança, Minas Gerais, apresentaram um projeto de uma linha de processamento de RSU para a produção de CDR. O RSU bruto passa por várias etapas, para homogeneização, até que se transforme em CDR (Figura 7).

Figura 7 – Linha de processamento de resíduos sólidos

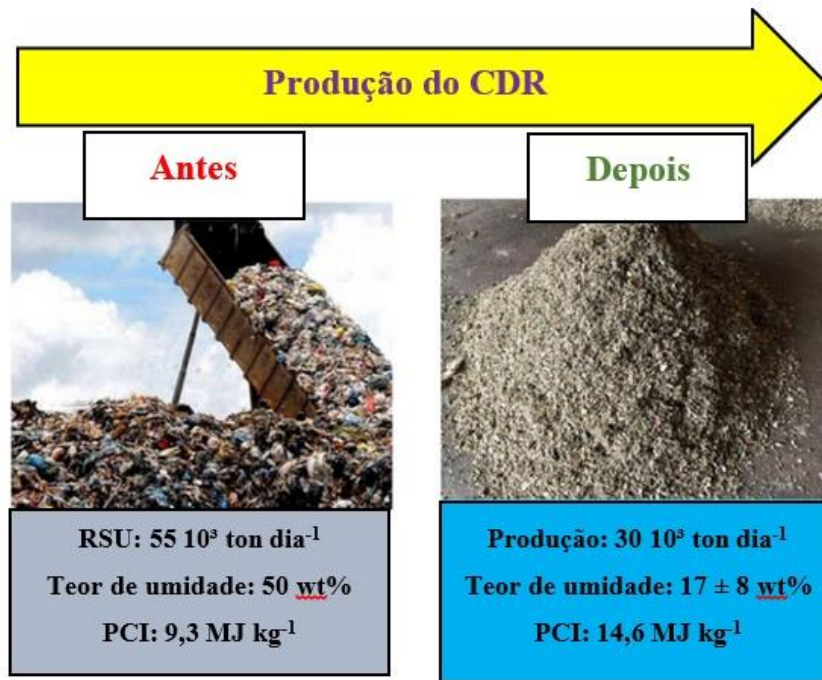


Fonte: Adaptado de INFUESTA et al., 2019.

De acordo com Infiesta et al. (2019), o RSU bruto é depositado em um silo e direcionado para um britador primário, que reduz o tamanho das partículas (80 mm), passa para segregação manual; depois, para um separador magnético. Na sequência, os resíduos são levados a outro triturador que reduz em partículas de 60 mm, segue por um aerotransportador, para a retirada de materiais de alta densidade, depois, para o triturador terciário, que reduz as partículas para 40 mm, seguem para um redemoinho, que separa os materiais não ferrosos e, por último, passa por um triturador quaternário, que reduz as partículas para 25 mm.

O exemplo indica que o processo descrito auxiliou à obtenção de maior homogeneidade do material, bem como melhores resultados de parâmetros, como umidade e poder calorífico (Figura 8).

Figura 8 - Resumo dos resultados encontrados no processamento e produção de CDR na literatura



Fonte: Adaptado de INFIESTA et al., 2019.

Desta forma, o teor de umidade do RSU de 50 % foi reduzido para, aproximadamente, 17 ± 8 % (base úmida), quando transformado em CDR e conseqüentemente, o poder calorífico inferior (PCI) aumentou de 9.300 J g^{-1} para 14.300 J g^{-1} , os quais convertidos em (PCS): 11.978 J g^{-1} para 14.811 J g^{-1} .

No entanto, segundo Kitto e Stultz (2005), a presença de elementos químicos no CDR, como o cloro (Cl), o flúor (F), o cálcio (Ca) e o sódio (Na), podem causar deposições e conseqüente corrosão no interior da caldeira. Além disso, Sampaio (2014) aponta, em seus estudos, que caso o potássio (K) e o sódio (Na) não sejam devidamente quantificados e qualificados anteriormente ao processo de combustão, forem adicionados em excesso e/ou sem controle, podem formar aglomerados, de modo que, se não houver ação para sua correção, levará à sinterização de material sobre a grelha ou leito, ao causar danos de maiores proporções (KITTO; STULTZ, 2005; SAMPAIO, 2014).

De forma complementar, segundo Zhou, Liu e Zhang (2020), a incineração tem se mostrado uma estratégia de transformação de resíduos em energia mais viável e eficiente quanto ao manuseio de resíduos sólidos urbanos (RSU). No entanto, eles afirmam que um elemento chave em RSU, o cloro (Cl), provoca corrosão severa em caldeiras, e sua presença induz a liberação de dioxinas e furanos tóxicos, ou seja, poluentes orgânicos persistentes. Os autores afirmam, também, que, em geral, o cloro no RSU tem duas fontes primárias: plásticos, principalmente poli(cloreto) de vinila (PVC), e resíduos domésticos de cozinha, como fonte de

cloro inorgânico, principalmente cloretos, mas neste caso, dispersos e solúveis em água. Ainda, observaram que o cloro em PVC se converte facilmente em ácido clorídrico gasoso (HCl) a 300 °C. Já a decomposição de FeCl_2 , CoCl_2 e MgCl_2 é mais fácil com a temperatura inicial para a liberação de HCl em torno de 180, 300 e 415 °C, respectivamente. No entanto, concluíram que a exploração do mecanismo subjacente está longe de ser concluída, especialmente para CaCl_2 e CoCl_2 , o que requer estudos extras e intensivos para elucidar o mecanismo de liberação de cloro dessas espécies inorgânicas, mesmo a nível molecular, em termos de sua propensão de ligação iônica e quebra em altas temperaturas (ZHOU; LIU; ZHANG, 2020).

Infiesta et al. (2019) caracterizaram e avaliaram as propriedades do CDR obtido a partir do RSU proveniente de lixões municipais e aterros sanitários (Quadro 1).

Quadro 1 - Caracterização do CDR produzido a partir de resíduos municipais (lixão), de aterro sanitário e combinados

Parâmetros (unidade)	Composição da massa			
	100 % (lixão)	100 % aterro sanitário	50 % (lixão) 50 % (aterro sanitário)	Média
Cloro (Cl) (wt %)	0,49	1,5	0,62	0,87
Fluor (F) (wt %)	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Sódio (Na) (wt %)	0,21	0,33	0,26	0,27
Potássio (K) (wt %)	0,27	0,42	0,32	0,34

Fonte: Adaptado de INFIESTA et al., 2019.

Segundo Infiesta et al. (2019), os resultados obtidos foram semelhantes aos encontrados durante os estudos de viabilidade de recuperação energética para a geração de eletricidade. Pasek, Gultom, Suwono, (2013) obtiveram um teor de cloro de 0,49 %.

2.4.1. Legislação brasileira para o uso de CDR

No Brasil a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 313 (CONAMA, 2002) dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

Em 2020, a Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo publicou a Resolução SIMA n° 47, de 6 de agosto de 2020, que estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de CDR e da atividade de recuperação de energia,

proveniente do uso de CDR. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é quem regulamenta a resolução.

Em 10 de fevereiro de 2020, foi publicada a ABNT NBR 16849:2020, norma técnica brasileira que apresenta os requisitos relacionados à utilização dos resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), e estabelece, como limite máximo no processo de avaliação da elegibilidade para o emprego de resíduos classe II (Não perigosos na preparação de RSUE), um teor de cloro de 3 %.

A referida norma estabelece, também, um sistema de classificação do RSUE, que determina valores-limites de três características do resíduo (Quadro 2).

Quadro 2 – Limites para a classificação de RSUE

Característica de classificação				
Unidade	Medida estatística	Classes		
PCI (base seca)		P1	P2	P3
kcal/kg	Limite inferior da média (P ≥ 95 %)	PCI ≥ 4 750	4 750 > PCI ≥ 3 580	3 580 > PCI ≥ 2 390
Teor de cloro		C1	C2	C3
%	Limite superior da média (P ≥ 95 %)	CI ≤ 0,5	0,5 < CI ≤ 1,5	1,5 < CI ≤ 3,0
Teor de mercúrio		H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	Hg _{P80} ≤ 0,2	0,2 < Hg _{P80} ≤ 0,5	0,5 < Hg _{P80} ≤ 1

Fonte: ABNT NBR 16849:2020, 2020.

A combinação de códigos de classe constitui a classe da unidade de recuperação energética (URE), a partir dos resíduos sólidos urbanos, para fins energéticos (RSUE) utilizados na unidade.

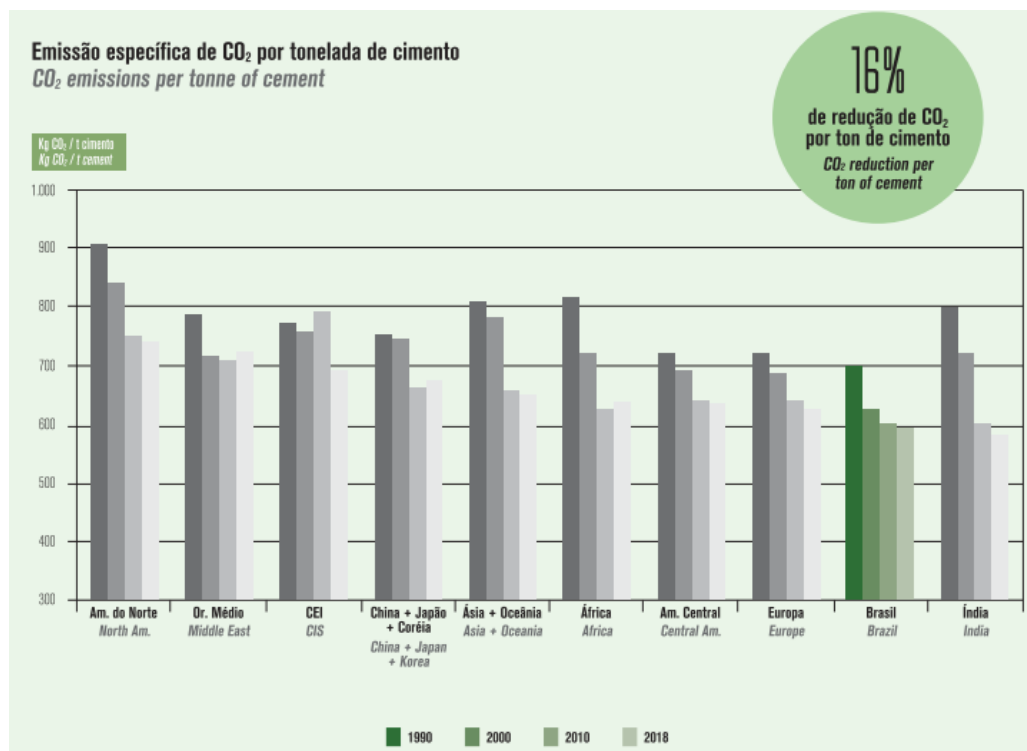
“Segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN, 2022), atualmente há 38 indústrias habilitadas para utilizar o CDR no Brasil, mas que esse número pode crescer impulsionado pelo Decreto Presidencial nº 10.936 de janeiro de 2022”. O documento institui o Programa Nacional de Logística Reversa, integrado ao Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir) e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). A associação afirma ainda que o decreto representa importante contribuição para o desenvolvimento potencial de produção de CDR no país, estimado em 20 milhões ton ano⁻¹, dez vezes maior que a produção vigente, cerca de 2 milhões ton ano⁻¹.

2.4.2. Aplicação do CDR nas indústrias cimenteiras

No Brasil, assim como em outros países, o aumento da necessidade de produção de cimento, matéria-prima fundamental para a indústria da construção civil, aliado ao urgente e, não menos importante, uso racional da energia, provocou e provoca uma constante busca por processos de geração de energia mais eficientes, fazendo com que o setor enfrente os desafios permanentes na conservação do material e recursos energéticos, além da redução das emissões de CO₂ (CHATZIARAS; PSOMOPOULOS; THEMELIS, 2016).

Segundo o Relatório anual de 2019 da Indústria de Cimento, embasada nos dados da *Global Cement and Concrete Association* (GCCA), publicada pelo Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), informa que, entre os anos de 1990 à 2018, o setor reduziu em 16 % suas emissões de carbono (Figura 9).

Figura 9 - Histórico global da emissão de CO₂ por tonelada de cimento, em 2019



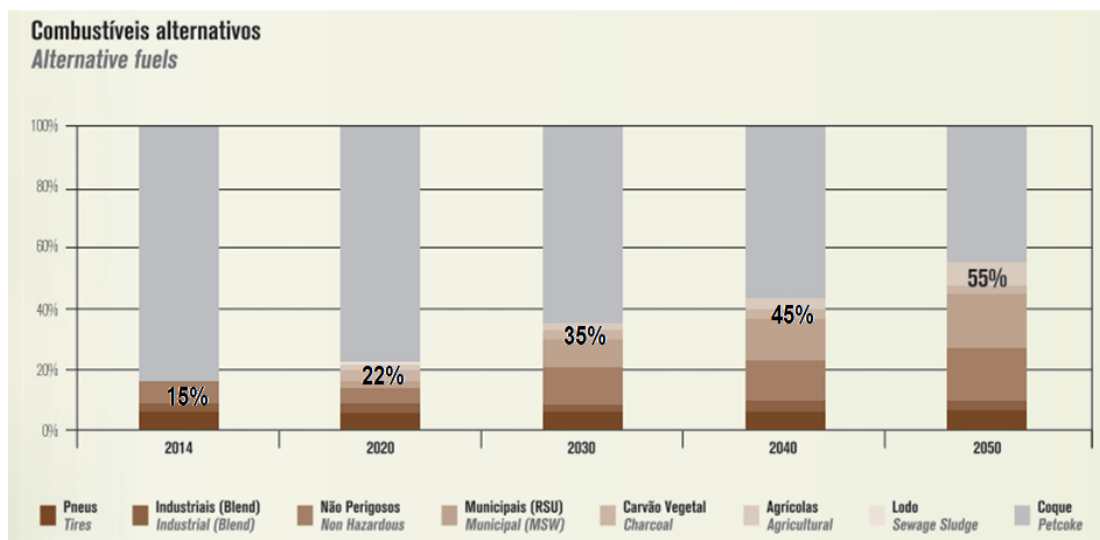
Fonte: Relatório anual de 2019 da Indústria de Cimento (SNIC, 2019).

O Brasil tem alcançado posição importante, em comparação com outros países (Figura 9), com uma das menores emissões específicas por tonelada de cimento produzida, ficando atrás somente da Índia.

Ainda segundo o referido relatório, como o setor é responsável por emitir, aproximadamente, 7% das emissões globais de carbono, com o intuito de se buscar meios de reduzir ainda mais as emissões de CO₂, em 2019, foi lançado o *Roadmap* Tecnológico do cimento, relatório elaborado em parceria com a Agência Internacional de Energia (SNIC, 2019).

No referido relatório, pode-se verificar que a aplicação de combustíveis alternativos, por meio da utilização de biomassas e resíduos com poder energético, em substituição aos combustíveis fósseis, representa a segunda principal alternativa do setor cimenteiro para a redução de emissão de carbono (Figura 10).

Figura 10 - Projeção da utilização dos Combustíveis Alternativos na produção de cimento no Brasil (2014 a 2050)



Fonte: Relatório anual 2019 da Indústria de Cimento (SNIC, 2019)

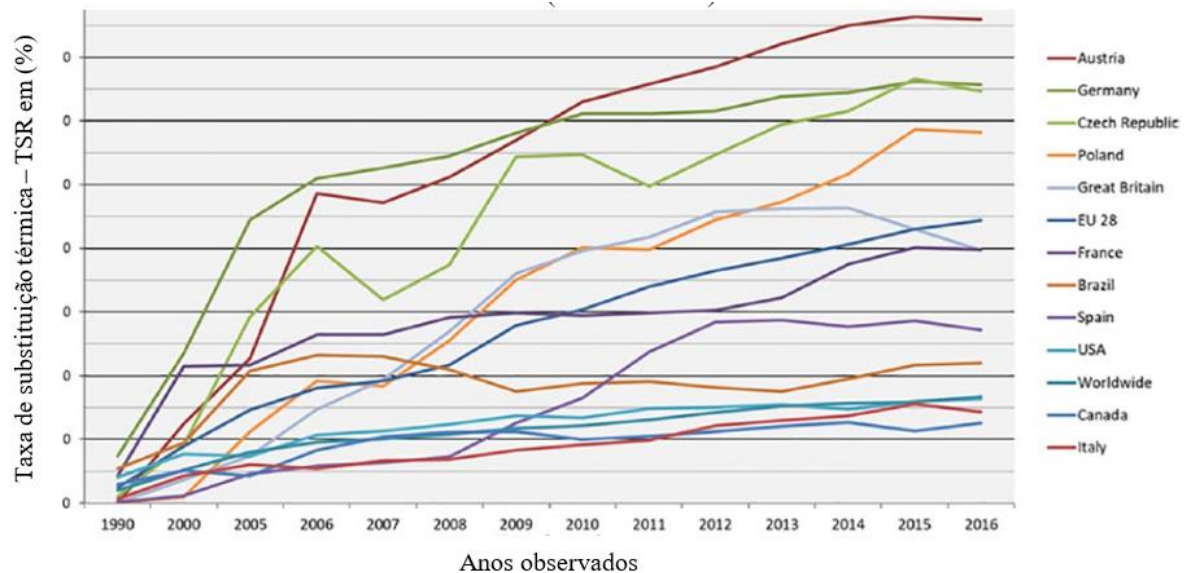
Ainda segundo o Relatório *Roadmap* Tecnológico do cimento, a ampliação da utilização dos combustíveis alternativos energéticos, de 15 % em 2014, para 55 % em 2050, pode resultar em uma redução cumulativa de 55 milhões de toneladas de CO₂. Isto significaria cerca de 13 % do potencial de redução do CO₂ do setor até 2050.

Segundo Viczek et al. (2021), os combustíveis primários necessários para a queima do clínquer nas indústrias cimenteiras são cada vez mais substituídos por combustíveis alternativos, incluindo os combustíveis sólidos recuperados, ou no Brasil, equivalente ao combustível derivado de resíduos (CDR).

De acordo com Sarc et al. (2019), a taxa média de substituição térmica tem aumentado em todo o mundo. A taxa média de substituição térmica é de cerca de 17 % (Figura 11), com apenas 13 % no Canadá e nos EUA 16 %, enquanto na União Europeia é de cerca de 44 % (ou

seja, 11.300 10³ t de resíduos de combustíveis utilizados em 2016). Na Áustria, a taxa de substituição térmica foi de, aproximadamente, 80 % em 2017, o maior do mundo.

Figura 11 - Taxa de substituição térmica (TSR em%) de combustíveis fósseis pelo uso de CDR na indústria de cimento em países selecionados, Membros da União Europeia (UE) 28 e em todo o mundo (1990 a 2016)



Fonte: Adaptado de SARC et al. (2019).

2.4.3. Caldeiras e os efeitos danosos causados pelo uso do CDR e de biomassas

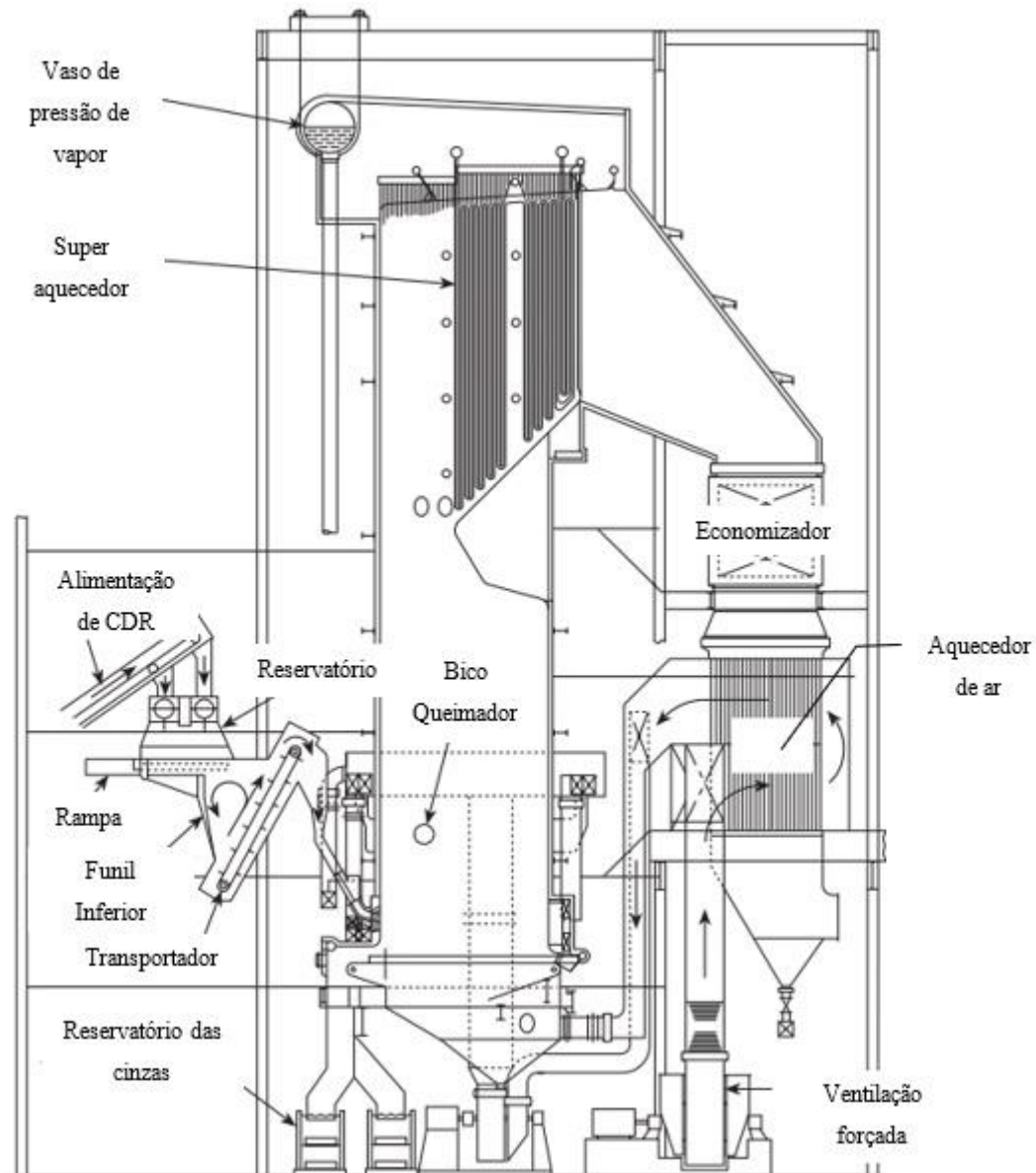
A norma regulamentadora brasileira, utilizada como referência para o auxílio à fiscalização e à utilização adequada de caldeiras, define que caldeiras a vapor “são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor de pressão superior à pressão atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, exceto refervedores (trocadores de calor) e similares” (MTB, 2019).

A geração de vapor em uma caldeira ocorre devido à troca de calor da água, por meio de superfícies, em contato com o combustível queimado, no interior da fornalha (SAMPAIO, 2014).

A necessidade e o uso de vapor estão presentes nos mais diferentes setores industriais, tais como: siderurgia, petroquímica, alimentos, papel e celulose, metalurgia, mineração, entre muitos outros. A principal função da caldeira é a geração de vapor, para alimentar os processos de transformação de cada setor (SAMPAIO, 2014).

De forma simplificada, pode-se dizer que um ciclo de potência em uma caldeira (Figura 12) se dá por um sistema composto por um gerador de vapor alimentado por algum combustível, uma turbina, um gerador elétrico, um condensador para o resfriamento e troca de calor, a fim de manter o sistema controlado que, por fim, retorna ao sistema por uma bomba. Para a determinação e o controle da eficiência de um ciclo de potência, utiliza-se o estudo clássico da termodinâmica, modelado normalmente pelo ciclo de *Rankine* ou pelo ciclo de *Carnot* (SAMPAIO, 2014).

Figura 12 – Caldeira de terceira geração para queima de CDR



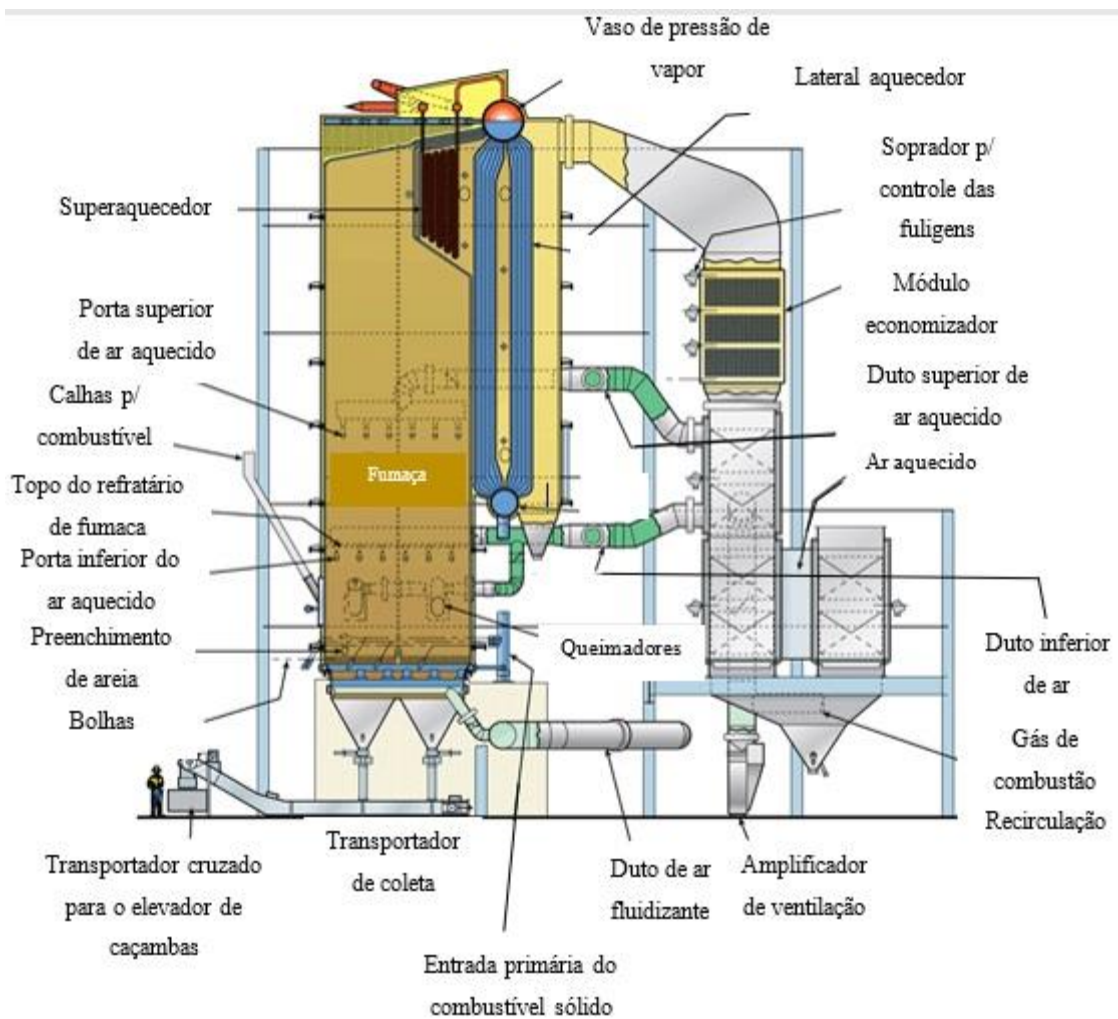
Fonte: Adaptado de (KITTO, J. B.; STULTZ, 2005).

Segundo Kitto e Stultz (2005), as primeiras caldeiras do mundo alimentadas por CDR começaram a operar no Canadá, em 1972. Nos Estados Unidos, a primeira entrou em operação em 1979. Tais projetos foram desenvolvidos com base nas caldeiras alimentadas a lenha. Melhorias, como o uso de revestimento com liga metálica, com maior resistência à corrosão, foi necessária. O modelo de terceira geração (Figura 12) tem um sistema de ventilação forçada de ar, que proporciona significativa melhora de eficiência da combustão. Além disso, os sistemas de processamento do combustível foram especialmente aprimorados, se comparados com os modelos anteriores.

De acordo com Kitto e Stultz (2005), o modelo de caldeira projetada para ser utilizada em ampla variedade de combustíveis, sejam queimadas separadamente ou de forma combinada é o denominado caldeira de leito fluidizado borbulhante ou *Bubbling Fluidized Bed* (BFB) (Figura 13).

Ainda, conforme Kitto e Stultz (2005), o processo de combustão usa um material inerte, normalmente areia, e combustível, para formar um leito no fundo do forno. Este leito é suspenso por uma corrente de ar fluidizante, para cima. O combustível introduzido no leito é rapidamente volatizado. Uma quantidade significativa de voláteis escapa da cama e são queimados na área da borda livre, acima da cama. Os voláteis restantes e o carbono fixo, queimam na cama. Para alcançar uma combustão eficiente e com baixas emissões, a temperatura do leito é controlada na faixa de 732 a 899 °C. O BFB é particularmente adequado para combustíveis residuais com alta umidade, como lodo de esgoto e vários lodos produzidos em fábricas de papel e celulose e de reciclagem, mas também pode queimar uma variedade de outros combustíveis, como resíduos de madeira, casca, carvão, combustível derivado de pneus, óleo e gás natural.

Figura 13 – Caldeira de leito fluidizado borbulhante (em inglês, *Bubbling Fluidized Bed* - BFB)

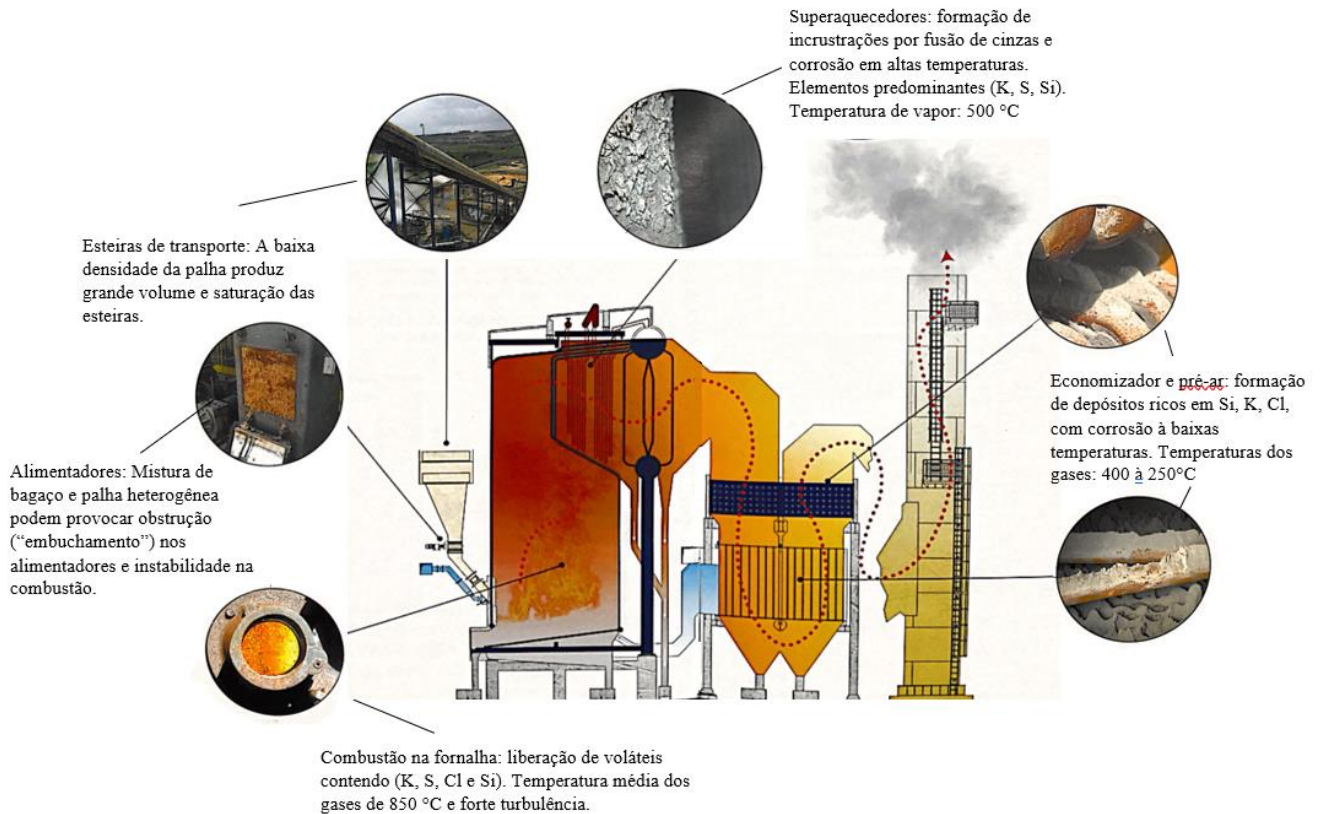


Fonte: Adaptado de *Webpage B&W*

Além das adaptações necessárias às caldeiras para o uso do CDR como combustível, conforme Kitto e Stultz (2005), vale destacar que a utilização das biomassas também pode gerar efeitos deletérios.

O Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC), publicou um estudo, que analisou e identificou possíveis danos causados em caldeiras ao utilizar biomassas bagaço e palha de cana-de-açúcar, de forma heterogênea. A localização das áreas afetadas e os detalhes dos danos causados estão apresentados na Figura 14 e no Quadro 3 (SOARES et al., 2019).

Figura 14 – Efeitos danosos em caldeiras



Fonte: Adaptado de (SOARES et al., 2019).

Quadro 3 - Identificação dos possíveis dos compartimentos e dos possíveis danos em uma caldeira genérica

Localização do compartimento da caldeira	Possíveis danos e características
Esteiras de transporte	A baixa densidade da palha produz grande volume e saturação das esteiras.
Alimentadores	Mistura de bagaço e palha heterogênea podem provocar obstrução (“embuchamento”) nos alimentadores e instabilidade na combustão
Combustão na fornalha	Liberação de voláteis contendo (K, S, Cl e Si). Temperatura média dos gases de 850 °C e forte turbulência.
Superaquecedores	Formação de incrustações por fusão de cinzas e corrosão em altas temperaturas. Elementos predominantes (K, S, Si). Temperatura de vapor: 500 °C
Economizador e pré-ar	Formação de depósitos ricos em Si, K, Cl, com corrosão à baixas temperaturas. Temperaturas dos gases: 400 à 250 °C

Fonte: Próprio autor (2021)

2.4.4. Misturas entre CDR e biomassas como combustível sólido

Sampaio (2014), realizou um estudo, considerando a queima de bagaço de cana-de-açúcar e parte do resíduo de uma cidade de 600.000 habitantes, em uma caldeira de leito fluidizado borbulhante de 60 MW. O estudo concluiu que 10% de CDR, mais o bagaço e a palha da cana formam uma composição adequada. Este indicador atendeu tanto aos aspectos relacionados aos impactos ambientais, como aos possíveis efeitos danosos à caldeira.

O estudo também concluiu que uma cidade com 600.000 habitantes produziria os resíduos necessários para a geração, em uma caldeira de leito fluidizado de 60 MW, operando com bagaço de cana-de-açúcar e com taxa de conversão de 30% de CDR. Contudo, levando em consideração os problemas de corrosão e/ou ambientais, definiu-se a quantidade de substituição em energia por CDR de 10 % (SAMPAIO, 2014).

Peters et al. (2020), embasados na hipótese de que a co-combustão entre biomassas e CDR em usinas existentes de alta eficiência é uma solução para mitigar as mudanças climáticas, experimentaram três composições de biomassas, em uma planta piloto de uma caldeira tipo leito fluidizado circulante com capacidade de até 1 MW. Foram testados: linhito puro, linhito misturado com a palha de diversos cereais (cevada, trigo, centeio, aveia) e linhito com CDR. O estudo analisou o impacto das condições hidrodinâmicas do leito fluidizado, a transferência de calor entre água e geração de vapor, bem como a composição dos gases formados. Ainda, apesar das diferenças existentes entre as propriedades de cada material, a caldeira demonstrou flexibilidade na combustão. Constataram, também, que a co-combustão de CDR e a palha não causou efeito negativo na estabilidade hidrodinâmica.

2.5. Compósitos de polímeros e biomassas

Para uma análise inicial do potencial energético e possibilidades da formação de compósitos entre polímeros e biomassas, vale reunir informações sobre as principais características dos plásticos mais habitualmente utilizados no Brasil. O Quadro 4 reúne os principais tipos de polímeros, suas aplicações, temperaturas de fusão cristalina e poder calorífico, de acordo com Rossini (2005) e outros autores.

Quadro 4 - Principais tipos de polímeros utilizados no Brasil, suas aplicações, temperaturas de fusão e poder calorífico

Tipos	Aplicações	Temp. de fusão (°C)	Poder Calorífico (J g ⁻¹) ³
PEBD (Polietileno de baixa densidade)	Sacolas para supermercados, filmes para embalar alimentos, sacaria industrial, filmes para fraldas descartáveis, bolsa para soro medicinal, sacos de lixo, brinquedos, canos, tubos, isolamento de fios elétricos entre outras.	85 a 125	(39.500) ⁴
PEAD (Polietileno de alta densidade)	Embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercados, tampas, tambores para tintas, utensílios domésticos, tubos para distribuição de água e gás, tanques de combustível automotivo entre outras.	130 a 140	45.701
PP (Polipropileno) Homopolímero	Utilizado para filmes para embalagens e alimentos, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, caixas de bebidas, autopeças e seringas descartáveis entre outras.	160 a 175	42.089
BOPP (<i>Biaxially oriented polypropylene</i>), Homopolímero (grade do PP)	Película de polipropileno biorientado, permite melhor impressão (muito utilizado na forma de filmes em rótulos e etiquetas, onde é exigida uma aparência mais nobre), melhor barreira à umidade e melhores propriedades ópticas (indicado para utilização em frascos plásticos transparentes e embalagens diversas de alimentos).	160 a 175	42.089
PVC poli(cloreto de vinila)	(Utilizado em embalagens de alimentos, cosméticos e medicamentos; em mangueiras em geral; na construção civil em tubos e conexões, em conduítes, em recobrimento de fios e cabos, em forração, em revestimento de pisos, em esquadrias e janelas; como “couro sintético” para indústria de calçados, bolsas e estofados; acessórios médico-hospitalares, dentre outras diversas aplicações) ² .	(100 a 260) ¹	18.239
PET poli(tereftalato de etileno)	Frascos e garrafas para uso alimentício, hospitalar e cosmético, películas para filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis entre outras.	245 a 270	23.254

¹(AKDOGAN, A., VANLI, 2017); ²ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico); ³(PESSOA, 2020); ⁴Sharuddin et al. (2016 apud Pessoa, 2020);

Fonte: Adaptado de (ROSSINI, 2005).

Em complemento, apenas para efeito comparativo, o Quadro 5 apresenta valores de poder calorífico de alguns combustíveis.

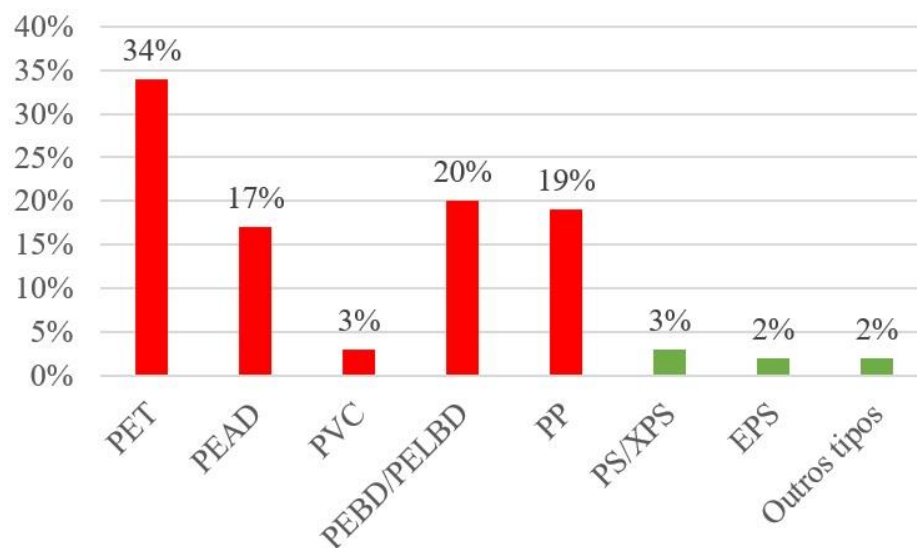
Quadro 5 – Valores de poder calorífico de combustíveis

Tipos	Poder Calorífico (J g ⁻¹)
Carvão mineral ⁵	22.329
Diesel ⁴	43.000
Etanol ⁸	22.509
Gasolina ⁴	42.500
GLP líquido ⁷	42.500
GLP natural ⁷	47.141
Papel ⁶	31.127
Óleo combustível ⁵	48.611

⁴Sharuddin et al. (2016 apud Pessoa, 2020); ⁵Costa (2006 apud Pessoa, 2020); ⁶Tec em calor (Disponível em: <<https://bit.ly/3z7gL2Y>> Acesso em: 24 jul. 2022.); ⁷Boundy et al. (2006 apud Pessoa, 2020); ⁸Novacana (Disponível em: <<https://bit.ly/3zIFfB1>> Acesso em: 29 jul. 2022.)

Além disso, para obter-se uma visão geral da distribuição do plástico pós-consumo no Brasil, conforme “Relatório do Cálculo dos Índices de Reciclagem Mecânica de Plásticos Pós-Consumo no Brasil”, a distribuição, em 2020, por tipo de material plástico que totalizou 1.402 milhões de toneladas de resíduo consumido na reciclagem, pode ser visto na Figura 15 (MAXIQUIM, 2021).

Figura 15 - Distribuição em % do material plástico consumido em 2020



Fonte: Adaptado de (MAXIQUIM, 2021).

Pode-se observar que o PVC que contém a maior quantidade de cloro em sua composição e é um dos elementos que pode causar deposições e corrosões no interior da caldeira, está na menor faixa da distribuição.

Já com relação às possibilidades de misturas entre polímeros e biomassas, vale observar que, segundo Rossini (2005), as blendas poliméricas podem ser obtidas basicamente de duas formas:

- ✓ Dissolvendo os polímeros em um solvente (aditivo), comum a eles, e posteriormente deixá-lo evaporar; e;
- ✓ Em um misturador, onde a temperatura de trabalho é alta o suficiente para fundir ou amolecer os componentes poliméricos, sem causar degradação deles.

Ainda de acordo com Rossini (2005), os principais aditivos são: de cura, de expansão, cargas, catalisadores, compatibilizantes, corantes, pigmentos, estabilizantes, lubrificantes, modificadores de impacto e plastificantes.

De acordo com Malinov e Sha (2003), é fundamental entender a correlação entre os materiais, o processamento, a microestrutura e as propriedades, de forma que habilite a otimização do processo, dos parâmetros e de suas composições, para atingir a combinação de propriedades desejada.

2.5.1. Processo de aglutinação de filmes plásticos

Uma das técnicas de preparo anterior para reaproveitamento e reutilização de polímeros em formato de filmes plásticos é a aplicação do processo de aglutinação.

Conforme o relatório técnico de Santos e Otterbach (2014), os filmes ou laminados de PVC e outros tipos de filmes plásticos podem ser aglutinados da mesma maneira. O equipamento utilizado para aglutinar filmes plásticos é denominado aglutinador, adensador, aglomerador, ou ainda, misturador (Figura 16).

O aglutinador possui facas rotativas helicoidais (hélices), dentro de uma cuba cilíndrica de aço (tambor), que cortam e atrimam o material inserido em suas paredes internas (Figura 17). Alguns modelos apresentam uma plataforma de operação para o acesso à alimentação do tambor na parte superior, e todos têm uma abertura na parte inferior, sendo esta última, controlada manualmente por alavanca ou por eletroválvula pneumática, para a saída do material aglutinado.

Figura 16 – Representação esquemática de um aglutinador

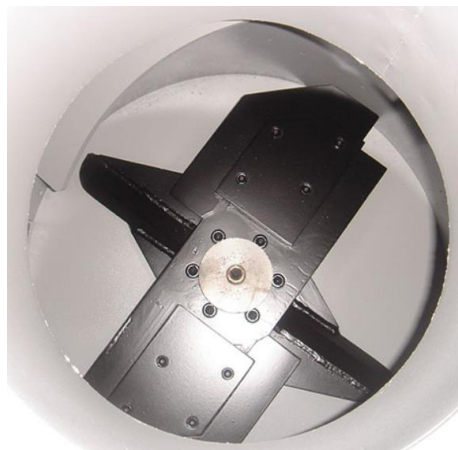


Fonte: Máquina Premiata (2014 *apud* Santos e Otterbach, 2014)

Ainda, o atrito dos fragmentos contra a parede do tambor provoca elevação de temperatura, levando a formação de uma espécie de massa plástica.

O aglutinador também pode ser utilizado para a incorporação de agentes aditivos, como compatibilizantes, cargas, pigmentos, lubrificantes, etc.

Figura 17 - Hélices dentro da cuba cilíndrica do aglutinador de filmes plásticos



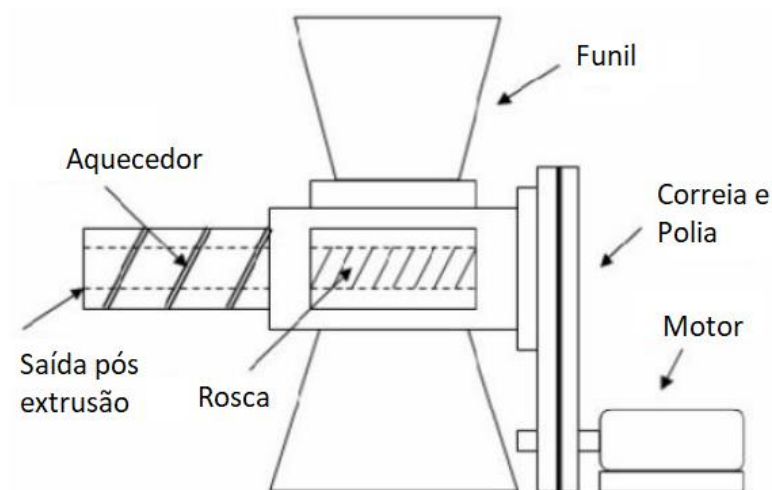
Fonte: Primotécnica Disponível em: <https://bit.ly/3mVCDZJ> Acesso em: 03 jan. 2021

Vale destacar que, ao aplicar-se o processo de aglutinação, as propriedades térmicas dos polímeros devem ser observadas, ou seja, as temperaturas de fusão e de inflamabilidade devem ser respeitadas, evitando assim a degradação do material.

2.5.2. Processo de Compactação por Extrusão

Outra técnica de reaproveitamento e reutilização de polímeros, é o processo de compactação por extrusão. A máquina aplica um esforço mecânico de compressão e aquecimento, em que conforma grânulos em componentes com formatos contínuos como, por exemplo, tubos, barras, hastes ou outros, conforme o tipo de matriz utilizada em sua saída. A Figura 18 ilustra um protótipo de uma máquina extrusora tipo parafuso com aquecedor na matriz de saída do processo (KERDSUWAN; MEENAROCH; CHALERMCHAROENRAT, 2016).

Figura 18 - Máquina de extrusão tipo parafuso com aquecedor na matriz



Fonte: Adaptado de (KERDSUWAN; MEENAROCH; CHALERMCHAROENRAT, 2016)

Segundo Kerdsuwan, Meenaroch e Chalermcharoenrat (2016), a fabricação de briquetes de CDR triturado a partir de uma máquina extrusora alcançaram alta densidade aparente e sem uso de aglutinante.

Em outro estudo, Tai, Chang e Su (2006), alcançaram, por meio do processo de extrusão dos resíduos em depósito de veículos descartados, a recuperação do conteúdo energético de CDR, cerca de 20 a 30% do peso dos materiais residuais não recicláveis originados dos veículos. Também, segundo os autores, os outros 70% do peso, aproximadamente, passaram por processo de desmontagem e foram destinados aos materiais reciclados.

2.6. Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE – São Paulo 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> Acesso em 17 jul. 2021.

ABETRE. **Atlas da Destinação Final de Resíduos no Brasil (2020)**. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes – ABETRE – São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/2UP0U8G>> Acesso em 17 jul. 2021.

ABNT NBR 16849:2020 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Brasil, 2021. Seção 1, p. 30.

ABREN. **Portal Saneamento Básico (2022)**. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos – ABREN – São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/3zihqjR>> Acesso em 04 jun. 2022.

AKDOGAN, A., VANLI, A. S. Wood-Reinforced Polymer Composites. In: **Wood in Civil Engineering**. Istanbul, Turkey: Mechanical Engineering Department, Yildiz Technical University, 2017.

AREIAS, A. A. **Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos; Sorocaba, 2020.

ÂRIÑA, D.; BENDERE, R.; DENAFAS, G.; KALNAČS, J.; KRIIPSALU, M. Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: The Case Studies in Latvia and Lithuania. **Environmental and Climate Technologies**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 112–118, 2020. DOI: 10.2478/rtuect-2020-0090.

BIAŁOWIEC, A.; PULKA, J.; STEPIEŃ, P.; MANCZARSKI, P.; GOŁASZEWSKI, J. The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [S. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.020.

BRASIL. **DECRETO Nº 10.936, DE 12 DE JANEIRO DE 2022**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.936-de-12-de-janeiro-de-2022-373573578>. Acesso em: 04 jun. 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030 Geração Termelétrica – Biomassa**. 2007. Brasília, DF. DOI: 10.1371/journal.pone.0004742. Disponível em: http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.

CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; VAN DER HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A

spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, n. February, p. 391–399, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.001.

CETESB. **RESOLUÇÃO SIMA No 047, DE 06 DE AGOSTO DE 2020**. p. 1–19. Disponível em: <https://bit.ly/3QtX25q>. Acesso em: 10 jul. 2021.

CHATZIARAS, N.; PSOMOPOULOS, C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 178–193, 2016. DOI: 10.1108/MEQ-01-2015-0012.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos; 2011.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e etanol no Brasil Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília, DF. Disponível em: <https://bit.ly/351fqPR>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CONAB. **Acomp_safra_bras_cana_v.7_Safra_2019_20_n.3_Terceiro_levantamento_Brasília_p_1-62**. Brasília, DF. Disponível em: <https://bit.ly/3nAkiBQ>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CONAMA. **Resolução no 313, de 29 de outubro de 2002**. Ministério do Meio Ambiente, [S.l.], p.85–91,2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>.

COSTA, A. O. DA, et al. **NT-Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2020>, 2021. /. Acesso em: 23 jul. 2021.

EMBRAPA. **Perguntas e Respostas - Portal Embrapa**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 15 ago. 2021.

EMBRAPA. **O eucalipto e a Embrapa: Quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. 2021. 1a Edição ed. Brasília, DF. Disponível em: <https://bit.ly/3xS47p4>. Acesso em: 16 jul. 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. 2021. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico588/BEN_Síntese_2020_PT.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN Interativo epe**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>. Acesso em: 23 jul. 2021.

FENG, S.; CHENG, S.; YUAN, Z.; LEITCH, M.; XU, C. Valorization of bark for chemicals and materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 26, p. 560–578, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.06.024.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto : Aspectos morfológicos , fisiológicos , florestais, ecológicos e industriais , visando a produção de celulose e papel. **Eucalyptus Online Book e Newsletter**, [S. l.], p. 109, 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3zI8zYO>. Acesso em: 23 jul. 2021.

FOELKEL, C.. 2. Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade. In: **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. [s.l: s.n.]. p. 264. Disponível em: <https://bit.ly/3NXwBn3>. Acesso em: 23 jul. 2021.

GOLDEMBERG, J. Current and Prospects in the Use of Biomass for Energy Generation. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 15–28, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170004.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. Geração de energia por biomassa: Bagaço e palha de cana-de-açúcar. In: **Série caminhos para Sustentabilidade**. Piracicaba, PNUD-CTC. 2005.

IBÁ. **Relatório anual IBÁ. Ano base 2021**. Indústria brasileira de árvores. Associação Brasileira de Árvores, [S. l.], p. 93, 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3cWxE9f>>. Acesso em: 30 jul. 2022.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of na industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 236, p. 715–719, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.017.

KERDSUWAN, S.; MEENAROCH, P.; CHALERMCHAROENRAT, T. The Novel Design and Manufacturing Technology of Densified RDF from Reclaimed Landfill without a Mixing Binding Agent Using a Hydraulic Hot Pressing Machine. **MATEC Web of Conferences**, [S. l.], v. 70, p. 11003, 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20167011003.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio, USA: The Babcock & Wilcox Company, 2005. v. 41 DOI: 10.1128/AAC.03728-14. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1011.1669>. Acesso em: 27 jul. 2021.

LOPES, E. J.; OKAMURA, L. A.; MARUYAMA, S. A.; YAMAMOTO, C. I. Evaluation of energy gain from the segregation of organic materials from municipal solid waste in

gasification processes. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 116, p. 623–629, 2018. a. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.018.

MALINOV, S.; SHA, W. Software products for modelling and simulation in materials science. **Computational Materials Science**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 179–198, 2003. DOI: 10.1016/S0927-0256(03)00106-X.

MARSIGLIA, M. C. Projeto conceitual de uma planta industrial de geração de eletricidade a partir de cdr (1MWe). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, 2019.

MAXIQUIM. **Cálculo dos índices de reciclagem mecânica de plásticos**. Porto Alegre - RS. MMA. **Agenda 21 Brasileira**. 2003. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-brasileira.html>. Acesso em: 19 dez. 2021.

MTB. **NR-13 caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento**. Brasil, 2019. Seção 13, p. 43. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2022.

NEIVA, D. M.; ARAÚJO, S.; GOMINHO, J.; CARNEIRO, A. C.; PEREIRA, H. Potential of *Eucalyptus globulus* industrial bark as a biorefinery feedstock: Chemical and fuel characterization. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 123, p. 262–270, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.06.070.

NIELSEN, H. P.; FRANDBSEN, F. J.; DAM-JOHANSEN, K.; BAXTER, L. L. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 283–298, 2000. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00003-4.

PASEK, A. D.; GULTOM, K. W.; SUWONO, A.. Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, [S. l.], v. 45, n. 3, p. 241–256, 2013. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2013.45.3.3. Disponível em: http://journal.itb.ac.id/index.php?li=article_detail&id=822.

PETERS, J.; MAY, J.; STRÖHLE, J.; EPPLE, B. Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 18, p. 20, 2020. DOI: 10.3390/en13184665.

PINCELLI, A. L. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, [S. l.], v. 45, n. 115, p. 519–526, 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n115.09.

ROSSINI, E. L. **Obtenção da blenda polimérica PET/PP/PE/EVA a partir de “garrafas PET” e estudo das modificações provocadas pela radiação ionizante**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 2005.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. 2014. Escola de Engenharia de São Carlos, [S. l.], 2014.

SANTOS, V. F.; OTTERBACH, J. C. H. **Agglutinação de filme de PVC**. Rio Grande do Sul, 2014.

SARC, R.; SEIDLER, I. M.; KANDLBAUER, L.; LORBER, K. E.; POMBERGER, R. Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry - Update 2019. **Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, [S. l.], v. 37, n. 9, p. 885–897, 2019. DOI: 10.1177/0734242X19862600.

SETTE JR., C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. S.; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 122, p. 209–213, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.057.

SNIC. **Roadmap Tecnológico do CimentoRelatório, 2019. São Paulo**. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em: 19 dez. 2021.

SOARES, C. C. S. P.; TREZ, C. R.; CARVALHO, D. J.; JÚNIOR, P. C. G.; MANTELATTO, P. E. Processamento e queima de palha de cana-de-açúcar. **Projeto SUCRE - CNPEM**, [S. l.], p. 11, 2019.

TAI, H.; CHANG, S.; SU, W. Investigation of the derived fuel rod formation from auto shredder residue using an extrusion apparatus. **Environmental Progress**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 235–242, 2006. DOI: 10.1002/ep.10140.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Bioeletricidade - UNICA 2021**. 2021. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em: 27 jul. 2021.

VICZEK, S. A.; ALDRIAN, A.; POMBERGER, R.; SARC, R. Origins of major and minor ash constituents of solid recovered fuel for co-processing in the cement industry. **Waste Management**, [S. l.], v. 126, p. 423–432, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.03.032.

WIDYATMOKO, H. Refuse derived fuel potential in DKI Jakarta. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Univ Trisakti, Fac Landscape Architecture & Environm Technol, Environm Engn Dept, Jakarta, Indonesia FU - Universitas Trisakti FX - Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/106/1/012099>.

ZHOU, S.; LIU, C.; ZHANG, L. Critical Review on the Chemical Reaction Pathways Underpinning the Primary Decomposition Behavior of Chlorine-Bearing Compounds under Simulated Municipal Solid Waste Incineration Conditions. **Energy & Fuels**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 1–15, 2020. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b02958.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO DO CDR PARA A PRODUÇÃO DE MISTURAS COM BIOMASSAS

RESUMO

O combustível derivado de resíduos (CDR), parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), constituído pela sobra da reciclagem, é uma alternativa para ampliar a recuperação energética de materiais residuais. O objetivo foi caracterizar o CDR, a fim de identificar sua heterogeneidade ao longo do tempo. O CDR foi coletado na empresa Salmeron em Sorocaba-SP, Brasil. Foram coletadas dez amostras entre os anos de 2020 e 2021. As análises foram: análise imediata (teor de voláteis, cinzas e carbono fixo), poder calorífico superior (PCS), granulometria, espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e termogravimétrica (TGA). Os resultados mostraram valores médios do PCS para o CDR entre 18.778 J g^{-1} e 32.276 J g^{-1} , superiores aos das biomassas (eucalipto: 18.035 J g^{-1} ; palha de cana: 18.616 J g^{-1}), que indicaram possibilidade de produção de misturas entre os três materiais. Os componentes mais presentes identificados nas cinzas do CDR foram: Ca (20,24%), Ti (20,24%), Al (7,38%) e Si (6,26%) além do Cl (0,9%), que é um dos elementos responsáveis, tanto pela corrosão quanto pelos impactos ambientais. A análise termogravimétrica (TGA) mostrou que materiais que compõem o CDR foram degradados em tempos e temperaturas diferentes, reforçando sua heterogeneidade. Os resultados identificaram a heterogeneidade do CDR ao longo das coletas. Os resultados, principalmente os valores de PCS acima dos valores geralmente encontrados para biomassas, indicaram que o CDR pode ser uma alternativa para melhorar as propriedades energéticas das biomassas.

Palavras-chave: Energia térmica. Heterogeneidade. Poder calorífico superior. Reciclagem. Resíduos.

ABSTRACT

Refuse derived fuel (RDF), part of the municipal solid waste (MSW), constituted by the leftover from recycling, is an alternative to expand the energy recovery of waste materials. The objective was to characterize the RDF to identify its heterogeneity over time. The RDF was collected at the company Salmeron, specialized in waste management, in Sorocaba-SP, Brazil. Ten samples were collected between the years 2020 and 2021. The analyzes were: immediate analysis (content of volatiles, ash and fixed carbon), higher heating value (HHV), granulometry, energy dispersive spectroscopy (EDS) and thermogravimetric (TGA). The results showed average values of HHV for RDF between $18,778 \text{ J g}^{-1}$ and $32,276 \text{ J g}^{-1}$, relatively higher than those of biomass (eucalyptus: $18,035 \text{ J g}^{-1}$; cane straw: $18,616 \text{ J g}^{-1}$), which indicated possibility of producing blends between the three materials. The most present components identified in the RDF ash were: Ca (20.24%), Ti (20.24%), Al (7.38%) and Si (6.26%) in addition to Cl (0.9%), which is one of the elements responsible for both corrosion and environmental impacts. The thermogravimetric analysis (TGA) reinforced the heterogeneous characteristics of the material, which confirms the abundance of materials that make up the RDF, degraded at different times and temperatures. The results identified the heterogeneity of the RDF throughout the collections. The results, mainly HHV values above the values generally found for biomass, indicated that RDF can be an alternative to improve the energetic properties of biomass.

Keywords: Thermal energy. Heterogeneity. Higher Heating Value. Recycling. Waste.

3.1.Introdução

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2020 (ABRELPE, 2020), o país tem registrado um crescimento ascendente quanto à geração de RSU. Em 2020, foram gerados 79,6 milhões de toneladas de RSU. Ainda, em 2020, 40,5% desse material teve destinação inadequada.

Apesar dos sinais de evolução ao longo dos anos, os resíduos ainda geram impactos ambientais importantes, em função do volume produzido e pela prática no país ao uso do processo inadequado de descarte dos RSU, ou seja, o uso do denominado lixão. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE, 2020), ainda existem aproximadamente 45,13% de lixões em atividade, ou seja, considerando 5.570 municípios, existem, ainda 2.514 lixões.

Uma das formas de mitigar esse processo é a utilização de parte do RSU devidamente segregado na coprodução de combustível derivado de resíduos (CDR), que se baseia na utilização de resíduos para a geração de energia. (KITTO; STULTZ, 2005; PETERS et al., 2020; SAMPAIO, 2014).

De acordo com Garrido, Conesa e Garcia (2017), Bazargan, Rough e McKay (2018) e Widyatmoko (2018), existem possibilidades reais da utilização em processos de geração de vapor e/ou de energia de 100% de CDR, compactado em formatos de briquetes, ou ainda, misturados com outras biomassas vegetais. Białowiec et al. (2017), em seus estudos, afirmaram que a densificação de CDR via peletização pode aumentar a eficiência do manuseio, armazenamento e transporte.

O objetivo foi realizar a caracterização do CDR, com o intuito de identificar suas propriedades físicas e energéticas, e as possíveis diferenças (heterogeneidade) ao longo do tempo.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Material

O material utilizado neste estudo foi o Combustível Derivado de Resíduo (CDR), coproduto composto de resíduos sólidos industriais triturados após processo de segregação, desenvolvido em uma empresa especializada em gerenciamento de descartes, localizada no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil.

3.2.2. Coleta das amostras

As amostras de resíduos de CDR foram coletadas em uma empresa do Grupo Salmeron. A Figura 19 apresenta a localização, bem como em destaque a cobertura do galpão, onde foram realizadas as coletas, na qual pode-se observar uma abertura lateral.

Figura 19 - Vista de cima da localização do galpão da Salmeron Sorocaba-SP



Fonte: Google Earth (2021)

Para estabelecer um padrão de localização e de retirada no momento da coleta, foi escolhida a pilha na saída do processo de triagem e trituração (Figura 20), com abertura lateral. A altura do ponto das duas coletas foi de aproximadamente 1,5 m.

Figura 20 - CDR manejado em dia de coleta na empresa Salmeron



Fonte: Próprio autor (2020)

Foram realizadas 10 coletas, em dias e meses diferentes. As coletas foram realizadas: de novembro de 2020 à março de 2021(Tabela 1).

Tabela 1 – Frequência de coleta das amostras de CDR

Amostras	Identificação das coletas	Datas das coletas
1	CDR 1	17/11/2020
2	CDR 2	24/11/2020
3	CDR 3	08/12/2020
4	CDR 4	15/12/2020
5	CDR 5	19/01/2021
6	CDR 6	02/02/2021
7	CDR 7	09/02/2021
8	CDR 8	16/02/2021
9	CDR 9	23/02/2021
10	CDR 10	01/03/2021

Fonte: Próprio autor (2021)

Foram realizadas 2 coletas extras em julho de 2022 (Tabela 2).

Tabela 2 – Coleta de amostras extras de CDR

Amostras	Identificação das coletas	Datas das coletas
11	CDR 11	19/07/2022
12	CDR 12	19/07/2022

As coletas foram realizadas utilizando-se dois recipientes plásticos iguais com tampa, buscando manter a máxima similaridade possível da coleta e originalidade da amostra (Figura 21).

Figura 21– Momento de retirada da coleta de CDR na empresa Salmeron



Fonte: Próprio autor (2020)

Os resíduos coletados foram armazenados em recipientes plásticos e lacrados. A massa média de cada coleta foi de 600 g de CDR, divididos em dois recipientes. O material foi encaminhado para o Laboratório de Biomassa e Bioenergia da UFSCar, campus Sorocaba, para as análises.

3.2.3. Preparação das amostras

Em laboratório, cada uma das amostras foram devidamente acondicionadas em bandejas (Figura 22), foram encaminhadas para secagem inicial, em estufa com renovação e circulação de ar da SOLAB (Figura 23) a 60° C, durante 24 horas, evitando assim, a degradação do material e a geração de odores, bem como permitindo a sua estocagem segura.

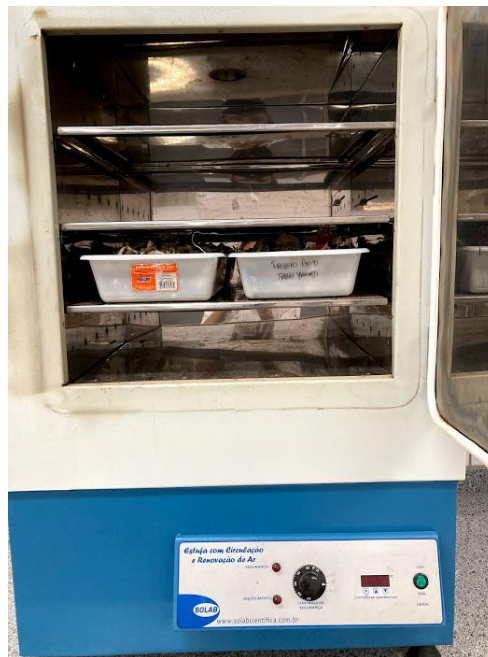
Paralelamente, com base na norma técnica ASTM E871-82 (2019), parte do material foi usado para a determinação da umidade em condições de coleta. Parte das amostras foram colocadas em bandejas plásticas, de massa conhecida, pesadas e inseridas em estufa, a $103 \pm 1^\circ$ C, com pesagens até apresentarem massa constante. O material seco por completo foi utilizado na realização das etapas posteriores para caracterização do material.

Figura 22 – Bandejas com amostras de CDR de uma das coletas



Fonte: Próprio autor (2020)

Figura 23 – Bandejas com amostras de CDR de uma das coletas na estufa para secagem (SL-102/27, SOLAB)



Fonte: Próprio autor (2020)

Após a secagem, as amostras passaram pelo triturador (TM-05, Lippel, Brasil) e uma peneira, com abertura de 2,4 mm acoplada (Figura 24).

Figura 24 – Triturador utilizado na moagem dos materiais testados (TM-05, Lippel)



Fonte: Próprio autor (2020)

As amostras extras 11 e 12 (CDR *in natura*) foram também acondicionadas em bandejas, mas antes do encaminhamento para secagem foram conduzidas para a determinação da densidade a granel.

3.2.4. Granulometria

A determinação da granulometria dos resíduos (CDR 1 a 10) foi após a trituração. Sua determinação foi feita em triplicata, a partir da norma ASTM D293M-18 (ASTM, 2010), por peneiramento mecânico. Foram usadas quatro peneiras, com abertura de malha progressiva, com a abertura maior de 1/4 *mesh* (6,35 mm) e a menor, de 20 *mesh* (0,84 mm) (BERTEL, Brasil). O conjunto de peneiras foi instalado em um agitador orbital, com batidas intermitentes no topo, e sistema de agitação mecânica orbital, a 250 RPM, fixa (MA 750, MARCONI, Brasil) (Figura 25). Foi utilizada uma amostra de 100 g de material no ensaio. A agitação mecânica das peneiras foi realizada por 10 minutos.

Figura 25 – Agitador orbital (MA 750, Marconi), com quatro peneiras (1/4 a 20 *mesh*, em ordem crescente) (Bertel)



Fonte: Próprio autor (2020)

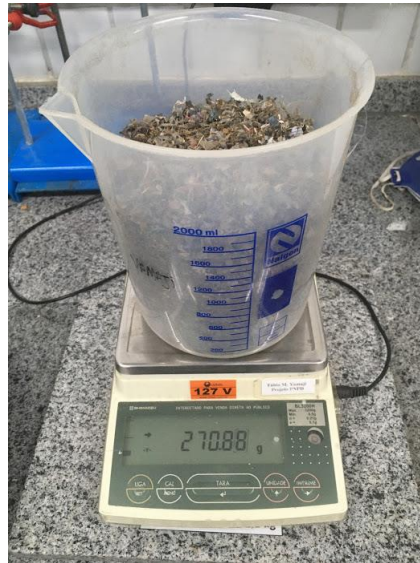
A determinação da granulometria das amostras extras 11 e 12 (CDR *in natura*), foi realizada sem a aplicação da trituração. Foram usadas quatro peneiras, com abertura de malha progressiva, com a abertura maior de 2 *mesh* (50 mm) e a menor, de 3/4 *mesh* (19 mm).

3.2.5. Densidade a granel

A determinação da densidade a granel (base seca, Equação 1) foi realizada a partir de um recipiente de volume conhecido.

Considerando as coletas de 1 à 10 já trituradas e também as extras 11 e 12, as amostras de CDR foram transferidas para um béquer de 2 litros de capacidade, até completar seu volume (Figura 26). Na sequência, foi registrada a massa da amostra, em balança semi-analítica (BL3200H, Shimadzu, Brasil). Essa determinação foi realizada em triplicata.

Figura 26 - Determinação da massa do recipiente com amostra (g) em balança semi-analítica (BL3200H, Shimadzu)



Fonte: Próprio autor (2020)

$$D_{gr} = \frac{m_{ra} - m_r}{v_r} \quad (1)$$

Onde:

D_{gr} = Densidade a granel ($g \cdot cm^{-3}$)

m_{ra} = massa do recipiente com amostra (g)

m_r = massa do recipiente (g)

v_r = volume do recipiente (cm^3)

3.2.6. Umidade

A determinação da umidade das amostras (Equação 2), nas condições em que foram coletadas, foi com base na norma técnica ASTM E871-82 (2019). O material foi colocado em bandejas de massa conhecida, pesado e levado para estufa com renovação e circulação de ar (SOLAB) a $103 \pm 1^\circ C$, durante 24 horas. O material foi pesado até atingir massa constante.

$$h(\%) = \frac{(m - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

h = umidade (%);

m = massa inicial (g);

m_s = massa final seca (g)

3.2.7. Análise imediata

3.2.7.1. Teor de voláteis

O teor de voláteis (materiais que evaporam facilmente) (Equação 3) foi determinado com base na norma ASTM E872-82 (ASTM, 2019). Foram colocados, aproximadamente, 2,0 g do material seco em cadinhos de porcelana, previamente calcinados e com tampa, de massa conhecida. Em seguida, foram pesados em balança analítica de quatro casas decimais (AUY220, Shimadzu, Japão) e levados para o forno tipo mufla (LF00212, JUNG, Brasil; Figura 27) a 950 °C, onde ficaram, primeiro, por três minutos sobre a porta aberta, e nos sete minutos seguintes, dentro, de porta fechada. Posteriormente, os cadinhos foram resfriados em dessecador com sílica e pesados. A determinação foi realizada em triplicata.

Figura 27 - Forno tipo mufla (LF00212, JUNG), usado na produção das cinzas



$$TV (\%) = \frac{(m_{is} - m_{fs})}{m_{as}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$TV =$ Teor de voláteis (%);

$m_{is} =$ massa do cadinho mais amostra inicial seca (g);

$m_{fs} =$ massa do cadinho mais amostra final seca (g)

$m_{as} =$ massa da amostra seca (g)

3.2.7.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas (resíduos da combustão) (Equação 4) foi determinado, em triplicata, com base na norma (ASTM D1102-84, 2021). Os cadinhos de porcelana, previamente calcinados, foram pesados, foram adicionados 2,0 g de CDR seco e levados ao forno-mufla, à 600 °C, por seis horas. Depois, foram resfriados em dessecador com sílica e pesados em temperatura ambiente.

$$TC_z (\%) = \frac{(m_{cr} - m_c)}{m_{as}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

$TC_z =$ Teor de cinzas (%);

$m_{cr} =$ massa do cadinho mais o resíduo após a combustão (g);

$m_c =$ massa do cadinho (g)

$m_{as} =$ massa da amostra seca (g)

3.2.7.3. *Teor de carbono fixo*

O carbono fixo (Equação 5) foi determinado subtraindo-se de 100 % da soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas.

$$TCO_f (\%) = 100 - (TC_z + TV) \quad (5)$$

Onde:

TCO_f = Teor de carbono fixo (%);

TC_z = Teor de cinzas (%);

TV = Teor de voláteis (%).

3.2.8. **Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)**

Para as análises de MEV e de EDS, foram utilizadas as cinzas das amostras. O equipamento utilizado para as análises foi da HITACHI, modelo TM 3000 (Figura 28).

Figura 28 – Microscópio eletrônico de varredura (TM 3000, Hitachi) usado nas análises de MEV/EDS



Fonte: Próprio autor (2020)

As cinzas coletadas do material, após a queima, foram analisadas por meio da microscopia eletrônica de varredura, para a caracterização estrutural semiquantitativa dos elementos químicos que compõem as amostras. As amostras, foram fixadas em suporte metálico

sobre fita adesiva dupla face de carbono. A tensão aplicada de aceleração foi de 15 kV. A identificação dos elementos nos gráficos gerados no EDS foi para os picos maiores ou iguais à 0,4 cps/ev (contagens por segundo por elétron-volt). As análises de EDS foram realizadas em triplicata.

3.2.9. Poder calorífico superior (PCS)

O PCS foi determinado a partir de 1 g de amostra seca, com base na norma (ASTM D5865-13, 2014). Para a realização das análises, foi utilizado um calorímetro (C200, IKA; Figura 29).

Figura 29 - Calorímetro usado na análise de poder calorífico superior (C200, IKA)



Fonte: Próprio autor (2020)

3.2.10. Análises termogravimétricas (TGA)

As amostras foram trituradas em liquidificador, para reduzir a granulometria abaixo de 60 *mesh* (0,25 mm). As análises de TGA foram realizadas no equipamento Pyris1 (Perkin Elmer, Estados Unidos da América; (Figura 30), com temperatura inicial ambiente (30 °C) e temperatura final de 750 °C, com atmosfera de ar sintético (fluxo de 20 ml min⁻¹) e com razão de aquecimento de 20 °C min⁻¹.

Figura 30 - TGA (Pyris1, Perkin Elmer) utilizado nas análises termogravimétricas



Fonte: Próprio autor (2020)

3.2.11. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas respeitando os pressupostos de homogeneidade de variância e de normalidade dos resíduos, verificados pelo teste de Bartlett e de Shapiro-Wilk, respectivamente. Os dados obtidos das amostras, CDR (1 a 10) *in natura* (trituradas), de densidade a granel, umidade, análise imediata e poder calorífico superior, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao Teste de *Tukey* (com 5% de significância). Exclusivamente para análise da densidade a granel das amostras extras, CDR (11 e 12) *in natura* (sem trituração), os dados foram submetidos ao teste t- *Student*, pois trata-se da comparação de somente dois tratamentos para cada variável. Todos os testes foram calculados com o *software* R versão 3.1.3 (R Core Team, 20150).

3.3.Resultados e Discussão

3.3.1. Granulometria

A Tabela 3 apresenta a classificação granulométrica média das amostras de CDR (1 a 10) *in natura* (trituradas) e após processo de secagem. O valor encontrado resultou da média aritmética e seus desvios-padrão do ensaio em triplicata.

Tabela 3 - Classificação granulométrica média das amostras de CDR (1 a 10) *in natura* (trituradas)

Peneiras		% retida por peneira
Tyler (Mesh)	Abertura (mm)	
¼	6,35	12,81 ± 0,19
5	4,00	42,15 ± 0,52
10	2,00	28,85 ± 0,03
20	0,84	10,42 ± 0,18
Fundo	< 0,15	5,76 ± 0,14
Total	-	100,00

Fonte: Próprio autor (2021).

Pode-se observar na Tabela 3 que 70% dos resultados estão dentro de uma faixa de tamanho (entre 2 e 4 mm ou 10 e 5 *mesh*), devido ao processo de secagem e trituração aplicados em laboratório.

A Tabela 4 apresenta os valores da média aritmética do ensaio em triplicata e seus desvios-padrão das amostras extras de CDR (11 e 12) *in natura* (sem trituração) e após processo de secagem.

Tabela 4 - Classificação granulométrica média das amostras extras de CDR (11 e 12) *in natura* (sem trituração)

Peneiras		% retida por peneira
Tyler (Mesh)	Abertura (mm)	
2	50,00	36,44 ± 6,89
1.1/2	37,50	13,13 ± 1,95
1	25,00	18,69 ± 7,63
¾	19	15,29 ± 6,69
Fundo	< 0,15	16,45 ± 8,86
Total	-	100,00

Fonte: Próprio autor (2022).

Na Tabela 4, observa-se que praticamente 50% dos materiais ficaram dentro da faixa de tamanho (entre 37,5 e 50,0 mm ou 1.1/2 e 2 *mesh*), resultado esperado devido às características físicas do CDR *in natura* (sem trituração).

Comparativamente, pode-se notar a necessidade da aplicação do processo de trituração, a fim de homogeneizar as amostras e possibilitar a sequência das análises experimentais.

Entre as especificações definidas para a produção de CDR a partir de RSU, desenvolvidos por Infiesta et al. 2019, a granulometria na última etapa do processo foi de 25 mm. Tamanho de partículas também encontrado parcialmente, (19%), neste trabalho (Tabela 4).

Silva et al. (2015) afirmam, que a granulometria é uma importante característica a ser observada, pois interfere no processo de densificação do material, como por exemplo, o processo de briquetagem.

Assim, a granulometria confirmou a necessidade do processo de trituração, tanto para a sequência das análises em laboratório, como também em busca de um material mais uniforme para posterior aplicação ao processo de compactação, por meio de extrusão.

3.3.2. Densidade a granel

A Tabela 5 apresenta a densidade a granel média das amostras extras de CDR (11 e 12) *in natura* (sem trituração). O valor encontrado resultou da média aritmética e seus desvios-padrão do ensaio em triplicata.

Tabela 5 - Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR *in natura* e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)

Identificação da Coleta	Densidade (kg m ⁻³)	p-valor
CDR 11	32,04 ± 4,22	0,001556
CDR 12	11,95 ± 1,66	

Teste t-Student para amostras independentes; p < 0,05

Fonte: Próprio autor (2022)

Pode-se observar na Tabela 5 diferença estatística entre ambos, o que confirma a heterogeneidade do material. O resultado era esperado pois foram coletados em pilhas diferentes, as quais já apresentavam visualmente características físicas próprias. O teste reforçou a hipótese.

A densidade média obtida do CDR (11 e 12) *in natura* (sem trituração) foi de 22,00 kg m⁻³. Resultado relativamente baixo, comparado aos valores de CDR triturados encontrados (Tabela 6), mas esperado devido suas características físicas.

Como discutido nos resultados da granulometria, a trituração foi aplicada a fim de homogeneizar as amostras de CDR (1 a 10) *in natura* (triturados). Os valores encontrados resultaram da média aritmética do ensaio em triplicata e seus desvios-padrão (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR trituradas e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)

Identificação da Coleta	Densidade (kg m ⁻³)
CDR 1	134,04 ± 4,70 ^d
CDR 2	82,86 ± 2,91 ^f
CDR 3	118,78 ± 4,75 ^e
CDR 4	169,22 ± 5,94 ^{ab}
CDR 5	183,37 ± 4,94 ^a
CDR 6	159,00 ± 5,57 ^{bc}
CDR 7	154,00 ± 5,40 ^{bc}
CDR 8	147,00 ± 5,15 ^{cd}
CDR 9	194,00 ± 6,81 ^a
CDR 10	182,68 ± 6,41 ^a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

A densidade a granel média do CDR (triturado) ficou em $152,50 \text{ kg m}^{-3}$ (Tabela 6). Nota-se que, mesmo ao utilizar igual técnica de coleta, com os mesmos recipientes e ao adotar os mesmos procedimentos de preparação das amostras, como esperado, a densidade a granel do CDR (triturado) encontrada, também demonstra heterogeneidade.

Mesmo considerando as diferenças estatísticas das amostras de CDR (1 a 10), o menor resultado ($82,86 \text{ kg m}^{-3}$) é superior ao maior ($32,05 \text{ kg m}^{-3}$) do CDR (11 e 12).

Ao comparar-se a média do CDR *in natura* (sem trituração) (22 kg m^{-3}) com o CDR *in natura* (triturado) $152,50 \text{ kg m}^{-3}$, pode-se inferir que o processo de trituração favorece a aplicação de técnicas para compactação.

A densidade a granel especificada para a produção de CDR a partir de RSU, desenvolvidos por Infiesta et al. 2019 foi de 250 kg m^{-3} . Densidade superior ao encontrado neste trabalho, provavelmente devido à heterogeneidade do material, pois em cada localidade haverá naturalmente diferentes resíduos em sua composição além dos processamentos serem com tecnologias próprias.

Para uma análise geral, referente a transporte, armazenamento e manuseio do material estudado, foi comparada a densidade a granel do CDR (triturado) com a densidade de outros materiais. A densidade a granel encontrada por Chrisostomo (2011), por exemplo, do bagaço de cana, foi de $143,75 \text{ kg m}^{-3}$, valor relativamente próximo ao de $152,50 \text{ kg m}^{-3}$, encontrado para o CDR. Silva et al. (2015) encontraram densidade de 120 kg m^{-3} de serragem de eucalipto e de 70 kg m^{-3} da palha de cana-de-açúcar. Sette Jr. et al. (2018) encontraram, para a casca de eucalipto triturado, densidade de 250 kg m^{-3} . Neste caso, da casca de eucalipto, um resultado igual ao definido por Infiesta et al. 2019 para a produção do CDR.

Além disso, para o CDR, Peters et al. (2020) encontraram densidade de 190 kg m^{-3} e Hryb e Matyasik (2018), 160 kg m^{-3} . Assim, a densidade a granel média do CDR encontrado neste trabalho de $152,50 \text{ kg m}^{-3}$ comparado com a média de $200,00 \text{ kg m}^{-3}$ encontrada em outros estudos, apontam mais uma vez para sua heterogeneidade.

Todavia, quando se compara a densidade a granel de briquetes de biomassas, como em Silva et al. (2015), para serragem de eucalipto (920 kg m^{-3}) e para serragem de pinus (1000 kg m^{-3}) com a do CDR ($152,50 \text{ kg m}^{-3}$), pode-se observar um aumento da densidade de aproximadamente 6 vezes e 6,5 vezes, respectivamente. Já Garrido, Conesa e Garcia (2017), encontraram densidades superiores a 580 kg m^{-3} , com diferentes briquetagens entre biomassas e polímeros.

Desta forma, pode-se observar que a densidade do CDR encontrada demonstra que sua utilização sob trituração, tornou-se essencial para posterior compactação e além disso, encontrar

uma maneira de densificar o material se faz primordial. As densidades menores podem levar a maiores custos de transporte, e, em decorrência do maior volume, pode haver maiores dificuldades para estocagem e manuseio.

Assim, experimentar e propor possibilidades de aplicações de misturas entre CDR e biomassas, como casca de eucalipto ou palha de cana-de-açúcar, possibilitam densidades maiores, e podem auxiliar a obtenção de melhores resultados na relação custo-benefício de manuseio, transporte e estocagem.

Pode corroborar com os esforços, observar que a Resolução SIMA 047:2020 (CETESB, 2020) recomenda a homogeneidade para a produção do CDR.

3.3.3. Umidade

Os valores resultaram da média aritmética da umidade e seus respectivos desvios-padrão de cada uma das amostras, em duplicata, coletadas em dias diferentes (Tabela 7). As amostras foram coletadas a partir do mesmo procedimento.

Tabela 7 - Valores médios para a umidade (base seca) (%) das amostras de CDR e seus respectivos desvios-padrão (coletadas em 10 diferentes dias)

Identificação da Coleta	Umidade (base seca) (%)
CDR 1	53,96 ± 27,48 ^a
CDR 2	13,45 ± 0,11 ^b
CDR 3	15,94 ± 2,71 ^b
CDR 4	10,53 ± 5,03 ^b
CDR 5	8,76 ± 3,29 ^b
CDR 6	8,61 ± 1,59 ^b
CDR 7	2,53 ± 0,55 ^b
CDR 8	21,49 ± 0,47 ^{ab}
CDR 9	34,31 ± 2,51 ^{ab}
CDR 10	15,06 ± 6,07 ^b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

O teor de umidade médio ficou em 18,47 (%) (Tabela 7), com destaque para a grande variação da umidade, cujo maior valor foi, aproximadamente, 21 vezes o menor encontrado.

Valores relativamente altos foram verificados em algumas amostras (CDR1, CDR8 e CDR9). Houve diferença estatística entre as amostras, quanto à umidade. Pode-se notar que a diferença estatística provavelmente não foi maior, devido ao elevado desvio padrão encontrado na amostra CDR1. Essa característica pode ser explicada pelo fato do material ser empilhado embaixo da cobertura do galpão com abertura lateral que permite a circulação de ar, mas

também a entrada de chuva (Figura 20, página 65). Outra hipótese, é a própria e vasta diversidade dos materiais presentes nas amostras, incluindo materiais higroscópicos entre eles.

Como afirmam Bialowiec et al. (2017), a umidade é um dos parâmetros considerados fundamentais para a utilização de um material como fonte de energia. Eles afirmam, também, que a redução da umidade leva a vantagens: aumento do poder calorífico, redução por degradação biológica e diminuição da densidade.

Infiesta et al. (2019) encontraram teor de umidade de 50% na entrada do processo de produção de CDR, mas que, ao final do tratamento a umidade foi 15%. Pode-se observar que o teor de umidade médio encontrado (18,47%) é similar ao da literatura. Todavia, Peters et al. (2020) encontraram um teor de umidade de 43,1% para o CDR, e Widyatmoko (2018), 19,27%.

Edo et al. (2016), afirmam que a heterogeneidade e o alto teor de umidade tornam o pré-tratamento necessário para aprimorar suas propriedades como combustível.

3.3.4. Análise imediata

Os valores resultaram da média aritmética dos ensaios, em triplicata, do teor de voláteis e do teor de cinzas, com seus respectivos desvios-padrão, também da média de cada uma das amostras coletadas em dias diferentes (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise imediata das amostras de CDR (coletadas em 10 diferentes dias)

Identificação da Coleta	Teor de Voláteis (base seca) (%)	Teor de Cinzas (base seca) (%)	Teor de carbono fixo (%)
CDR 1	72,70 ± 0,96 ^{abc}	7,82 ± 0,37 ^a	19,46 ± 0,62 ^{ab}
CDR 2	71,92 ± 7,50 ^{abc}	14,57 ± 9,64 ^a	13,50 ± 2,15 ^b
CDR 3	69,55 ± 9,36 ^{bc}	13,96 ± 12,27 ^a	16,48 ± 2,91 ^{ab}
CDR 4	72,82 ± 1,38 ^{abc}	8,77 ± 1,88 ^a	18,40 ± 0,57 ^{ab}
CDR 5	82,30 ± 1,42 ^{abc}	7,16 ± 1,14 ^a	10,54 ± 0,44 ^b
CDR 6	87,44 ± 1,02 ^a	3,66 ± 0,31 ^a	8,90 ± 1,08 ^b
CDR 7	86,85 ± 1,15 ^{ab}	3,79 ± 0,55 ^a	9,35 ± 0,59 ^b
CDR 8	64,97 ± 14,35 ^c	5,36 ± 0,31 ^a	29,66 ± 14,05 ^a
CDR 9	78,12 ± 1,27 ^{abc}	7,24 ± 0,42 ^a	14,63 ± 0,86 ^b
CDR 10	78,21 ± 2,82 ^{abc}	7,83 ± 2,07 ^a	13,96 ± 0,75 ^b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

Os valores médios de voláteis, cinzas e carbono fixo encontrados foram: 76,49 (%), 8,02 (%) e 15,49 (%), respectivamente.

Quanto ao teor de cinzas, nota-se que apesar da análise estatística não apresentar diferença significativa, deve-se observar a variedade entre os valores médios e principalmente os elevados desvios-padrão encontrados nos CDR 2 e 3, que podem explicar o resultado da

análise. Portanto, com base no exposto e na experimentação realizada, pode-se afirmar que a heterogeneidade no CDR é de sua natureza. Essa característica leva a maiores incertezas operacionais no uso do CDR como fonte de energia.

Bialowiec et al. (2017) encontraram, um teor de cinzas de 14,3 %; Gulyurtlu et al. (2006), por sua vez, 22,5%; Edo et al. (2016) 17,2% e Peters et al. (2020), 16,3%. O valor médio de teor de cinzas encontrado na literatura, portanto, foi de 17,58%, que, comparado ao valor médio encontrado aqui (8,02%) mostraram divergências.

Bialowiec et al. (2017) encontraram, em seus estudos, um teor de voláteis de 76,0 %; Gulyurtlu et al. (2006) por sua vez, encontraram 68,2%; Edo et al. (2016), 79,6% e Peters et al. (2020), 78,3%. O valor médio do teor de voláteis encontrado na literatura foi de 75,56% que, comparado ao valor médio encontrado (76,49%), mostram, além de similaridade, uma importante característica do CDR como combustível: embora sua ignição seja aumentada, o tempo de permanência de geração de energia se torna reduzido, uma vez que, quanto menor o teor de voláteis, maior o tempo de fornecimento de energia. Por isso, encontrar misturas de CDR com biomassas pode ser uma alternativa para melhorar essa característica.

Já o teor de carbono fixo encontrado por Gulyurtlu et al. (2006) foi 9,3%; Edo et al. (2016), 3,3% e Peters et al. (2020), 5,4%. O valor médio de teor de carbono fixo encontrado na literatura, portanto, foi de 6,0%, que, comparado ao valor médio encontrado (15,49%), também mostraram divergências, que podem ser atribuídas à heterogeneidade do CDR. Em síntese, o valor médio de carbono fixo (15,49%), atingiu resultado maior comparado à literatura, já o teor de voláteis médio foi de 76,49%, similar à literatura, e o teor de cinzas foi de 8,02%, divergente da literatura. Assim, encontrar misturas entre o CDR e biomassas, que alcancem comportamento de um combustível mais homogêneo, pode ser uma alternativa viável.

3.3.5. Poder calorífico superior (PCS)

Os valores resultaram da média aritmética dos ensaios, em duplicata, dos valores de PCS e seus respectivos desvios-padrão, também da média de cada uma das amostras coletadas em dias diferentes (Tabela 9).

Tabela 9 - Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras de CDR triturado e seco (coletadas em 10 diferentes dias)

Amostra	PCS (J g ⁻¹)
CDR 1	21.103 ± 331,63 ^{abc}
CDR 2	27.063 ± 736,80 ^{abc}
CDR 3	20.442 ± 217,08 ^{bc}
CDR 4	18.778 ± 148,49 ^c
CDR 5	27.523 ± 2.153,14 ^{abc}
CDR 6	32.276 ± 287,08 ^a
CDR 7	31.673 ± 182,43 ^{ab}
CDR 8	26.510 ± 636,39 ^{abc}
CDR 9	24.905 ± 393,15 ^{abc}
CDR 10	22.865 ± 6.122,13 ^{abc}

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

O desvio padrão populacional entre o PCS, considerando as 10 (dez) diferentes amostras, foi de 4.343,22 J g⁻¹. O valor médio de PCS encontrado neste trabalho foi de 25.314 J g⁻¹.

Os valores encontrados de poder calorífico superior (PCS) são consideráveis, pois foram superiores aos encontrados para as biomassas casca de eucalipto (18.035 J g⁻¹) e palha de cana-de-açúcar (18.616 J g⁻¹), materiais também estudados neste trabalho. Pode-se notar que há variações dos valores obtidos, mas pelos valores de desvios-padrão elevados em alguns casos, fez com que não tenha sido observado diferença estatística entre a maioria das amostras, com exceção do CDR 4, característica que reforça a hipótese de sua heterogeneidade.

O PCS encontrado por Bialowiec et al. (2017) foi 26.900 J g⁻¹; Gulyurtlu et al. (2006), por sua vez encontraram 27.066 J g⁻¹; Edo et al. (2016), 35.430 J g⁻¹ e Peters et al. (2020), 40.593 J g⁻¹.

Peters et al. (2020) classificaram os materiais utilizados na combustão do CDR e encontraram uma participação de 25,6% de plásticos (folhas de plástico, espuma de plástico tridimensional), 32% de biomassa (papel, papelão, madeira e outras biomassas), 3% de inertes (vidros, pedras e metal), e 39,4% de outros materiais (plástico + metal híbrido, têxteis, fibras, tecidos e partículas finas indefinidas).

Se somados os plásticos (25,6%) com os outros (39,4%), que também contém plásticos, conforme a classificação de Peters et al. (2020), são 65,0% e, como em ambas as classificações existem plásticos, pode-se concluir que o CDR tem, em sua composição, maior percentual de polímeros.

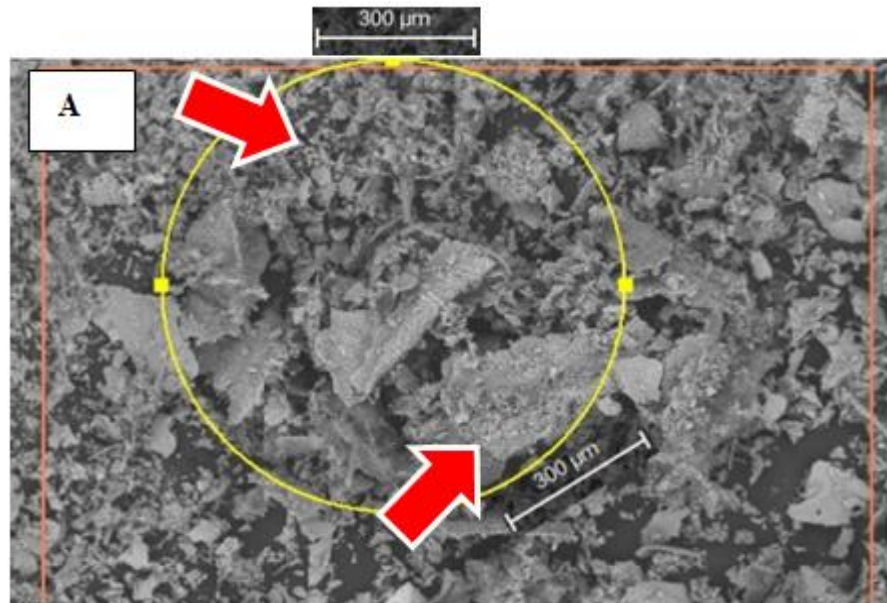
Ao analisar a classificação apresentada, bem como as observações realizadas durante as coletas, o manuseio, o armazenamento e as experimentações desta pesquisa, os dados reforçaram a heterogeneidade do material, e também a presença, em maior parte, de polímeros, o que explica um PCS maior que os encontrados em biomassas, como, por exemplo, 15.627 J g⁻¹ para a palha da cana-de-açúcar, ou 19.179 J g⁻¹ para a serragem de eucalipto (SILVA et al., 2015), ou ainda 18.541 J g⁻¹, do biochar de cama de frango para tratamento do solo (PEREIRA, 2019).

Contudo, o ponto forte da utilização do CDR como fonte de energia pode estar relacionado à presença do plástico em sua composição. Begum e Fawzia (2020) encontraram valor calorífico em *pellets* de poli(tereftalato) de etileno (PET), de 45.470 J g⁻¹. Vale observar que outros tipos de polímeros, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS), apresentam também altos valores de poder calorífico em relação aos encontrados nas biomassas de 15.000 a 18.000 J g⁻¹. Pessoa (2020), encontrou para o PEAD 45.470 J g⁻¹, para o PP 42.089 J g⁻¹ e 41.388 J g⁻¹ para o PS.

3.3.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) / espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

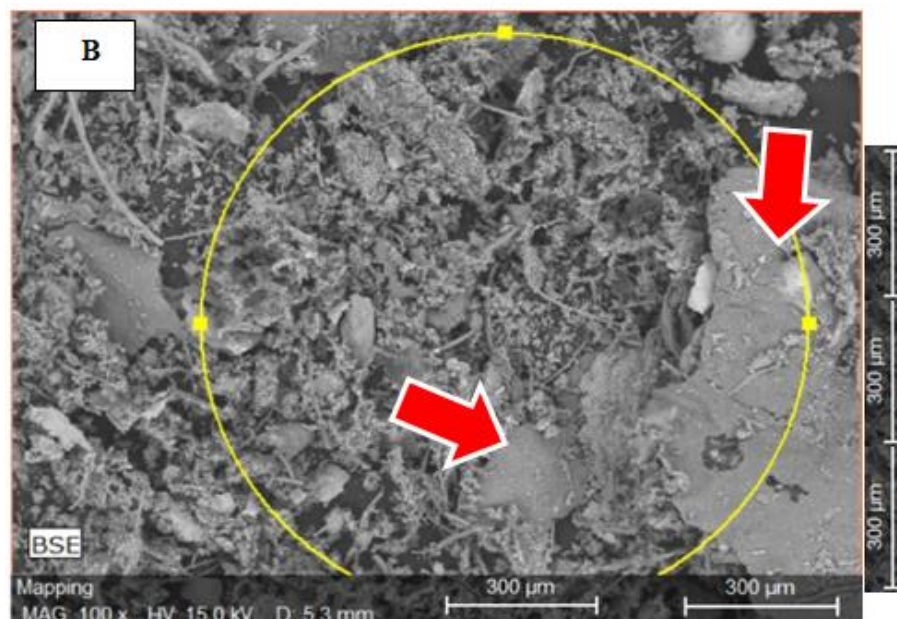
As Figuras 31 a 33 apresentam amostras de CDR visualizadas em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x.

Figura 31 – Amostra (CDR 5) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra A)



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 32 – Amostra (CDR 2) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra B)

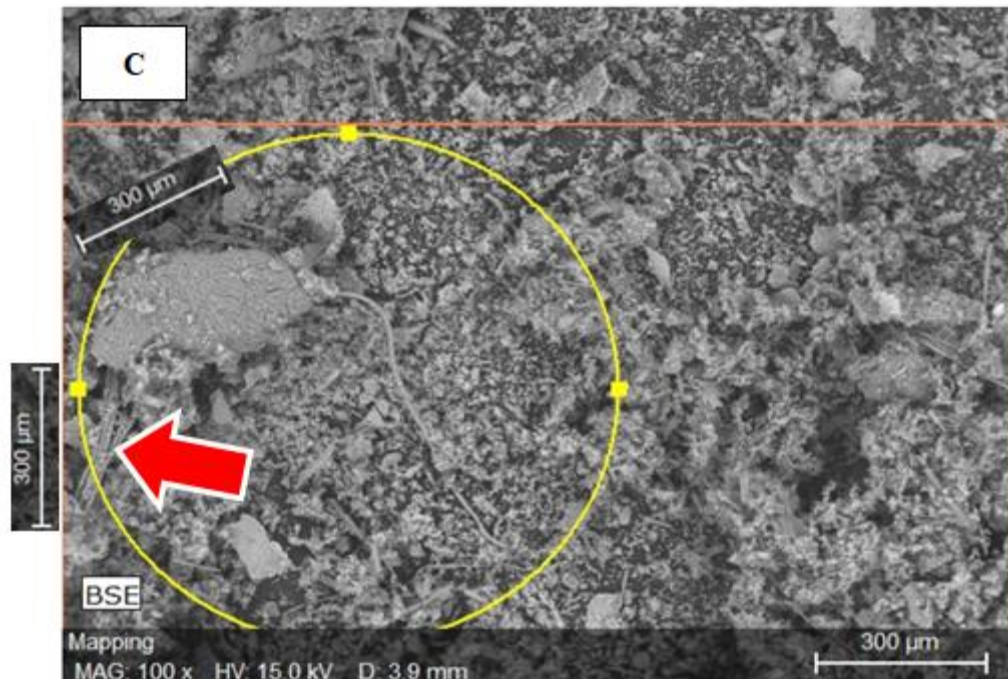


Fonte: Próprio autor (2021)

Nas cinzas do CDR (Figuras 31 a 33), é possível visualizar que as partículas possuem uma composição heterogênea, tanto em seus tamanhos, como em seus formatos (morfologia das cinzas). A maior parte das partículas variaram de tamanho: de 1 à 900 μm . Entre as maiores, que provavelmente são aquelas que não se degradaram a partir da temperatura e tempo durante a produção das cinzas, foi possível notar a presença de materiais lisos, que se assemelham a

metais como alumínio e titânio e ao semimetal silício (Figura 32: B). Observa-se, também, em todas as imagens, partículas com aspectos mais prismáticos e rugosidades mais acentuadas, que apontam para a presença de cálcio e potássio. Além disso, houve fibras de vidro não incineradas (Figura 33: C), apontando, ao mesmo tempo em que as amostras se assemelharam de um modo geral, para a heterogeneidade do material.

Figura 33 – Amostra (CDR 9) visualizada em MEV, analisadas em dias diferentes, com aumento de 100x (Amostra C)



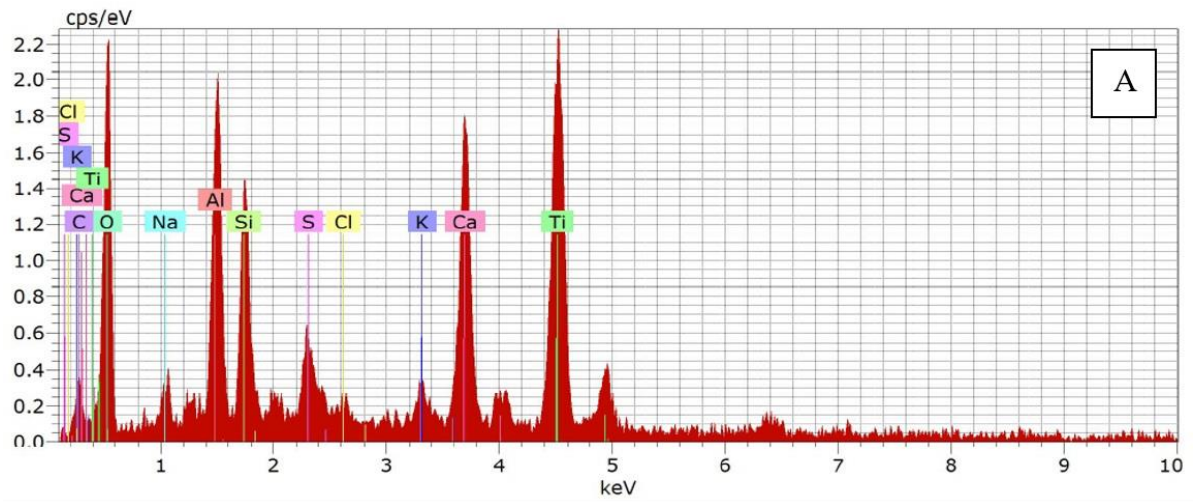
Fonte: Próprio autor (2021)

Segundo Sampaio (2014), os elementos cálcio (Ca) e cloro (Cl) encontrados podem causar deposições e corrosões no interior da caldeira. Elementos como Potássio (K) e sódio (Na), também presentes, podem causar incrustações nas grelhas, o que pode causar a sinterização do material e provocar uma parada emergencial.

Apesar da heterogeneidade observada influenciar na análise imediata do material, pode-se supor que as características encontradas não impedem a possibilidade da busca pela formação de misturas com outras biomassas por compactação e/ou extrusão.

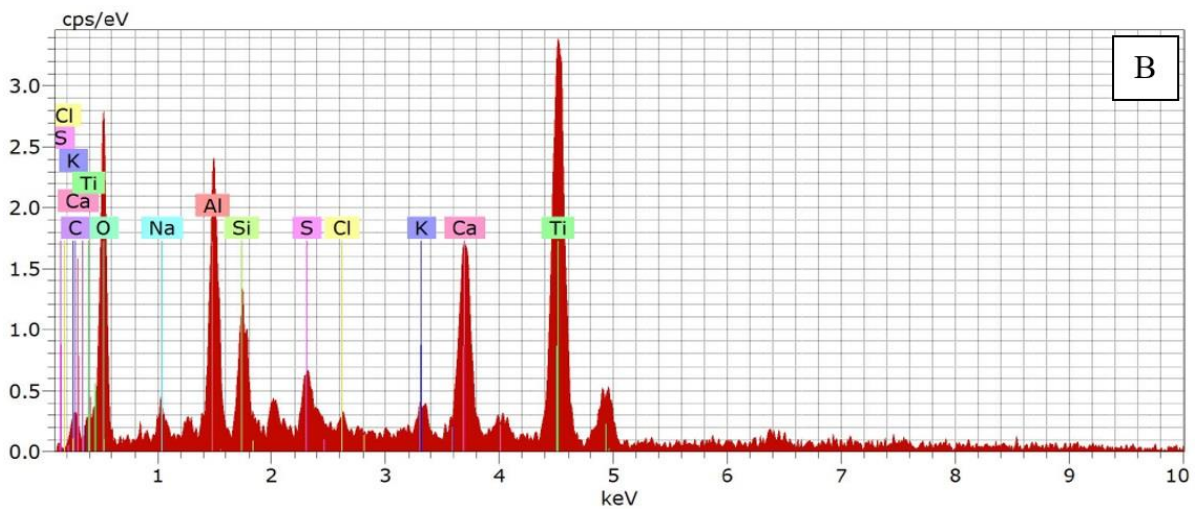
A espectroscopia por energia dispersiva (EDS) mostra alguns dos elementos contidos nas cinzas de três amostras, extraídas em diferentes dias (Figuras 34 a 36). Essas amostras foram as mais representativas, pois apresentaram os principais elementos mais abundantes nas amostras avaliadas via EDS.

Figura 34 - Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR (Amostra A)



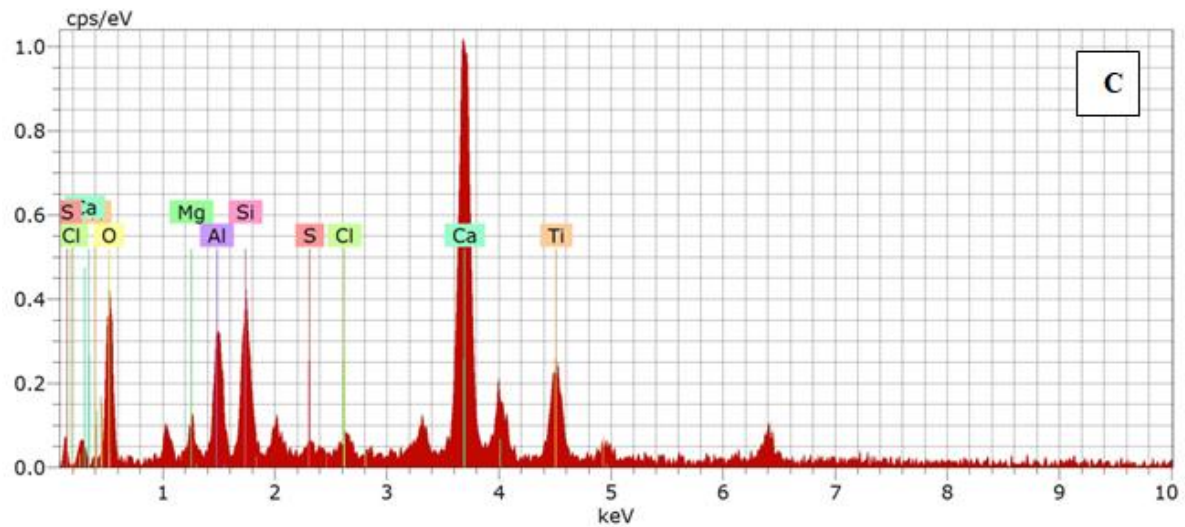
Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 35 - Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR (Amostra B)



Fonte: Próprio autor (2021)

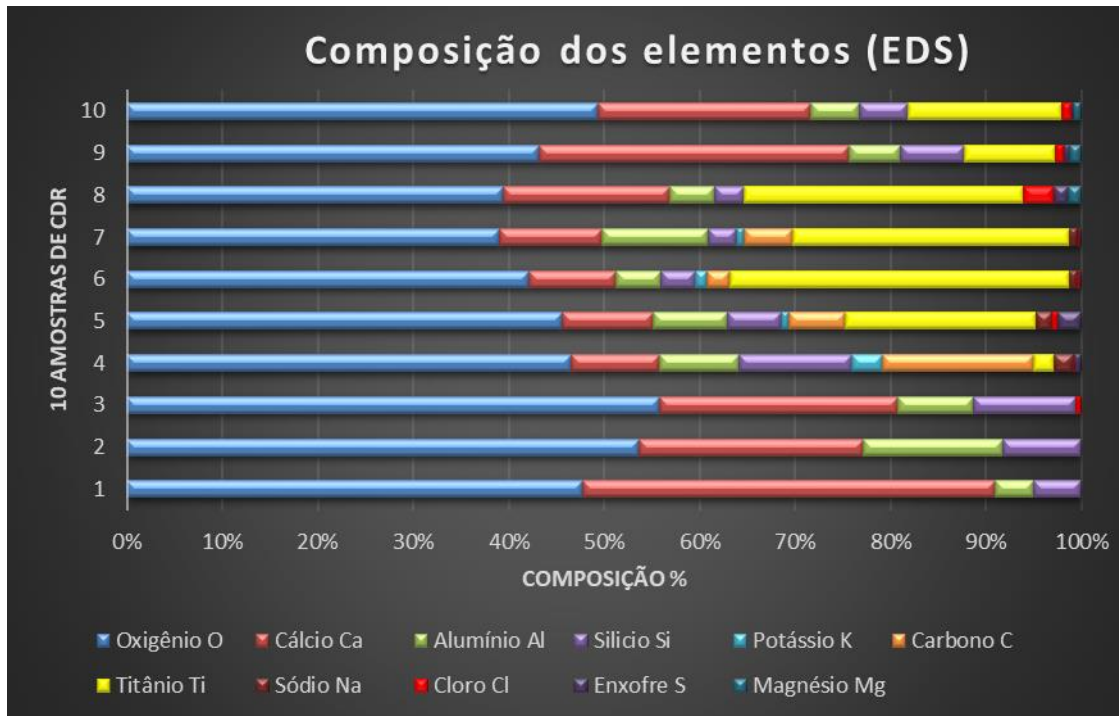
Figura 36 - Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas de uma das amostras do CDR (Amostra C)



Fonte: Próprio autor (2021)

Ao analisar os dados das 10 amostras, ao considerar-se a média da proporção encontrada em cada amostra (Figura 37), os elementos tiveram a seguinte distribuição identificada: Oxigênio (46,26%), Cálcio (20,24%), Titânio (20,24%), Alumínio (7,38%), Carbono (7,28%), Silício (6,26%), Potássio (1,55%), Sódio (1,30%), Magnésio (1,13%), Cloro (0,9%) e Enxofre (0,83%). Em todas as amostras, há a presença de elementos que podem causar danos em caldeiras, mesmo que em diferentes proporções. Todavia, vale destacar que, apesar da preocupação com o PVC, pertinente e importante, pois contém Cloro, em todas as amostras coletadas durante esta pesquisa foi, predominantemente, a menor parcela, se comparados aos demais tipos de plásticos presentes no CDR. Um dado que reforça essa observação é de que a análise desenvolvida aqui, que identificou a composição dos elementos presentes por meio da espectroscopia por energia dispersiva (EDS), o percentual do cloro foi de 0,9.

Figura 37 - Gráfico realizado a partir dos valores médios obtidos das cinzas do CDR (coletadas em 10 diferentes dias) por meio do EDS



Fonte: Próprio autor (2021)

A predominância na identificação do Oxigênio (46,26%) ocorreu pela formação dos óxidos nas cinzas. No entanto, outros elementos importantes quanto à danos em caldeiras podem ser encontradas. Assim, ao analisar a Figura 37, pode-se observar a predominância de Cálcio (20,24%), Titânio (20,24%), Alumínio (7,38%), Carbono (7,28 %) e Silício (6,26%), e em menores proporções, Potássio (1,55%), Sódio (1,30%), Magnésio (1,13%), Cloro (0,9%) e Enxofre (0,83 %). Apesar do CDR ter características próprias, pode-se supor também que não impedem a possibilidade da composição, por extrusão, de misturas entre o CDR e as biomassas em busca de melhorar o PCS da biomassa vegetal e ao mesmo tempo, compensar possíveis efeitos danosos que podem ser causados na caldeira quando da incineração de parte de resíduos plásticos presentes.

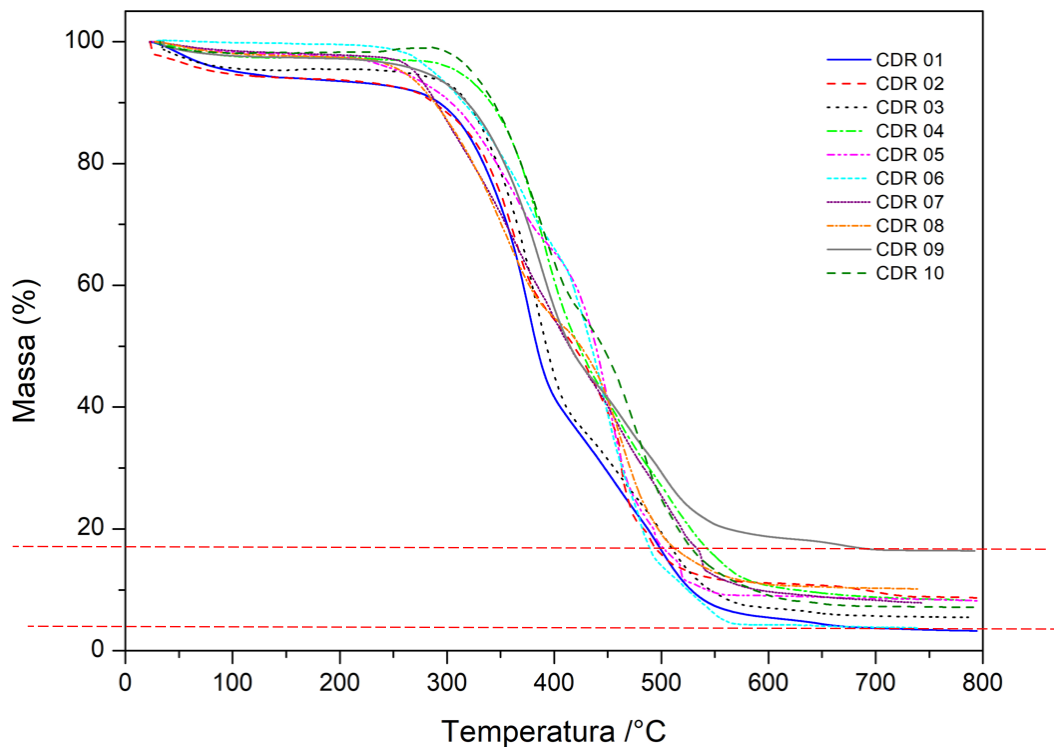
Prado et al. (2020), por exemplo, encontraram, por MEV e EDS das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, a predominância de matéria orgânica, potássio e cálcio. Os combustíveis estudados por Vassilev et al. (2010) foram as biomassas e, na composição das cinzas, houve elementos como: cálcio, potássio, silício e magnésio, alumínio, enxofre, ferro, fósforo, cloro e sódio.

Essas características reforçam para a possibilidade da experimentação da criação de misturas por meio de processo de extrusão de CDR com biomassas como palha de cana-de-açúcar e casca de eucalipto.

3.3.7. Análise termogravimétrica (TGA)

A Figura 38 apresenta as curvas TG das 10 amostras de CDR.

Figura 38 - Curvas de TG das 10 amostras de CDR (coletadas em dias diferentes) em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min^{-1} e razão de aquecimento de $20 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$

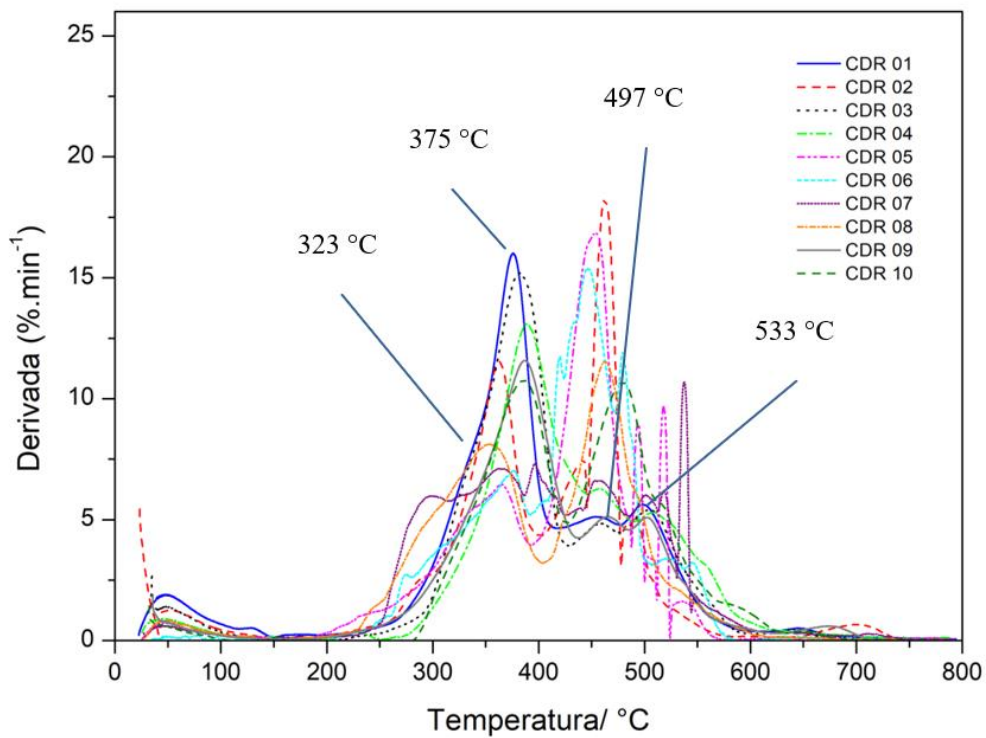


Fonte: Próprio autor (2021)

Nas curvas de TG (Figura 38), nota-se que a faixa de degradação observados após $600 \text{ }^\circ\text{C}$, compreendem a faixa de teores de cinzas levantados na análise imediata: 3,66 % e 14,57 % (Tabela 9, página 80). Considerando as diferenças entre o delineamento experimental de cada análise, pode-se inferir que estão coerentes.

A Figura 39 apresenta as curvas DTG das 10 amostras de CDR.

Figura 39 - Curvas de DTG de 10 amostras de CDR (coletadas em dias diferentes) em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min^{-1} e razão de aquecimento de $20 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$



Fonte: Próprio autor (2021)

Ao visualizar e comparar as curvas de degradação de 10 amostras de CDR (Figura 39), é possível afirmar que houve variação na degradação entre as amostras. Essa variação entre curvas pode ser explicada pela diferença da composição das amostras, visto que o CDR é um material caracteristicamente heterogêneo, variando seus componentes desde fragmentos de biomassa até fragmentos de polímeros.

Todavia, pode-se observar (Figura 39) que aproximadamente, 90% do CDR foi consumido em torno de $500 \text{ }^\circ\text{C}$, o restante do material teve parte degradada até $800 \text{ }^\circ\text{C}$. De forma geral, a fração de massa não degradada ao final do experimento (diferença entre massa inicial e massa final) é atribuída a composição inorgânica do material (TORQUATO, 2012).

Ao observar a Tabela 10 e a Figura 39, é possível compreender melhor a perda de massa das amostras de CDR, dada a ocorrência de picos, que descrevem os eventos ocorridos durante a degradação térmica. Apesar do comportamento heterogêneo das amostras, é possível destacar um comportamento padrão para todas, sendo ele a ocorrência de, no mínimo, dois picos maiores de derivada; para o CDR 1, por exemplo: ($T_{\text{degrad.1}} = 375 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\text{degrad.2}} = 533 \text{ }^\circ\text{C}$). Esses picos são atribuídos aos eventos de degradação relativos à matéria orgânica e polímeros respectivamente, pois pode haver sobreposição de efeitos entre eles. Enquanto a parte orgânica

se estende até aproximadamente 500 °C e normalmente se dá em três faixas de degradação: celulose, hemicelulose e lignina, a parte de polímeros compreende a faixa de 250 °C a 550 °C, e possui pico maior em temperaturas superiores as da matéria lignocelulósica, mas com maior estabilidade térmica.

Gerassimidou et al. (2020), ao estudar a caracterização do CDR por meio da termogravimetria, em atmosfera inerte e razão de aquecimento ($<10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$), relataram também dois picos de degradação junto a suas faixas de ocorrência, sendo eles: degradação da fração celulósica (200-400 °C) e degradação dos plásticos (400-600 °C). Queiroz (2014), ao analisar amostras de resíduos sólidos urbanos (RSU) em atmosfera dinâmica de N_2 (nitrogênio molecular) a 50 ml min^{-1} e razão de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$, constatou a degradação de papéis e madeiras ocorrendo de 166 °C a 372 °C, com pico em 331 °C. Por outro lado, os polímeros foram degradados de 372 °C a 592 °C, com pico em 457 °C. Mesmo respeitadas as diferenças dos delineamentos experimentais e dos valores de pico de cada ensaio, pode-se observar a ocorrência de comportamentos relativamente similares de degradação.

Os valores dos picos de degradação das análises das amostras de CDR feitas por TG e DTG estão apresentados na Tabela 10. Foram registrados pela TG, a temperatura inicial de degradação (T inicial) e a temperatura final de degradação (T final) e pela análise do DTG, dois picos da temperatura de degradação (T degrad.1) e temperatura de degradação (T degrad.2).

Tabela 10 - Valores das temperaturas obtidas a partir da análise termogravimétrica das amostras de CDR (coletadas em 10 diferentes dias)

Amostras	T inicial (°C)	T final (°C)	T degrad.1 (°C)	T degrad.2 (°C)
CDR 1	323,07	533,55	375,48	497,22
CDR 2	319,20	489,49	363,02	462,44
CDR 3	336,72	533,70	379,76	462,37
CDR 4	345,35	558,30	388,90	459,09
CDR 5	314,62	497,59	364,28	452,60
CDR 6	288,80	514,89	376,67	446,44
CDR 7	264,95	549,64	366,04	458,65
CDR 8	292,14	498,72	354,55	463,65
CDR 9	346,73	528,91	386,15	502,02
CDR 10	340,25	524,66	384,88	481,10
Média	317,18	522,95	373,97	468,56
Desvio Padrão	27,46	22,71	11,49	18,65

Fonte: Próprio autor (2022)

Vale observar que as temperaturas de degradação (Tabela 10), como esperado, foram superiores às temperaturas de fusão dos polímeros mais comuns, em torno de 85 a 270 °C; sendo: PEBD (85 a 125 °C), PEAD (130 a 140 °C), PP (160 a 175 °C), BOPP (160 a 175 °C), PVC (100 a 260 °C) e PET (245 a 270 °C), conforme Pessoa (2020).

A variedade de materiais que compõem o CDR (plásticos, metais, borrachas, biomassas, entre outros), seus diferentes tempos e temperaturas de degradação, e o poder calorífico considerável gerado por esses materiais, levam à hipótese de que enriquecer biomassas com o acréscimo do CDR para geração de energia faz-se viável.

Além disso, a presença no CDR de polímeros como, polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS) e o carbono proveniente das biomassas lignocelulósicas, ao sofrerem queima, possuem potencial para liberar energia útil em forma de energia térmica (PESSOA, 2020), o que reforça essa suposição.

3.4. CONCLUSÃO

O CDR apresentou ser um material heterogêneo ao longo do tempo (variação observada entre cada coleta). O PCS (média 25.314 J g⁻¹) pode ser considerado bom. Devido a baixa densidade (152,50 kg m⁻³) recomenda-se o processo de trituração e compactação para processos de geração de energia em caldeiras.

As amostras de CDR coletadas apresentaram elevada variação de umidade, provavelmente em decorrência do modo de estocagem e de sua própria natureza.

Na análise imediata foi possível observar que a maior fração do CDR é composta de material volátil, seguido de carbono e cerca de 8 % de cinzas.

O CDR apresentou características que reforçam a possibilidade da formação de misturas com biomassas.

3.5. Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE – São Paulo 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> Acesso em 17 jul. 2021.

ABETRE. **Atlas da Destinação Final de Resíduos no Brasil (2020)**. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes – ABETRE – São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/2UP0U8G>> Acesso em 17 jul. 2021.

ASTM D1102-84, ASTM. **Standard Test Method for Ash in Wood** 2021.

ASTM D293M-18. **Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke** 2010.

ASTM E872-82. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.

ASTM D5865-13, ASTM. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke** 2014.

ASTM E871-82. **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.

BAZARGAN, A.; ROUGH, S. L.; MCKAY, G. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environmental Technology**, KN Toosi Univ Technol, Dept Civil Engn, Tehran, Iran, v. 39, n. 7, p. 931–938, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1317835.

BEGUM, S.; FAWZIA, S. Characterization of Fuel Pellets From Plastic (PET) Waste. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, [S. l.], 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00008-0.

BIAŁOWIEC, A.; PULKA, J.; STĘPIEŃ, P.; MANCZARSKI, P.; GOŁASZEWSKI, J. The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [S. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.020.

CETESB. **RESOLUÇÃO SIMA No 047, DE 06 DE AGOSTO DE 2020**, p. 1–19. Disponível em: <https://bit.ly/3QtX25q>.

CHATZIARAS, N.; PSOMOPOULOS, C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 178–193, 2016. DOI: 10.1108/MEQ-01-2015-0012.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2011.

EDO, M.; BUDARIN, V.; ARACIL, I.; PERSSON, P.; JANSSON, S. The combined effect of plastics and food waste accelerates the thermal decomposition of refuse-derived fuels and fuel blends. **Fuel**, [S. l.], v. 180, p. 424–432, 2016. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.062.

GARRIDO, M. A.; CONESA, J. A.; GARCIA, M. D. **Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes**. [S. l.], 2017. DOI: 10.3390/en10070850. Disponível em: www.mdpi.com/journal/energies.

GERASSIMIDOU, S.; VELIS, C. A.; WILLIAMS, P. T.; KOMILIS, D. Characterization and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S. l.], v. 38, n. 9, p. 942–965, 2020. DOI: 10.1177/0734242X20941085.

GULYURTLU, I.; CRUJEIRA, T.; LOPES, M. H.; ABELHA, P.; BOAVIDA, D.; SEABRA, J.; GONÇALVES, R.; SARGAÇO, C.; CABRITA, I. The study of combustion of municipal waste in a fluidized bed combustor. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, [S. l.], v. 128, n. 2, p. 123–128, 2006. DOI: 10.1115/1.2191507.

HRYB, W.; MATYASIK, P.. Mercury content in refuse-derived fuels. **Archives of Environmental Protection**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 65–72, 2018. DOI: 10.24425/aep.2018.122304.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 236, p. 715–719, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.017.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio, USA: The Babcock & Wilcox Company, 2005. v. 41 DOI: 10.1128/AAC.03728-14. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1011.1669>.

PEREIRA, M. E. **Resíduos de cama de frango para fabricação de biochar**. 2019. UFSCar-So, [S. l.], 2019.

PESSOA, J. S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

PETERS, J.; MAY, J.; STRÖHLE, J.; EPPLE, B. Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 18, p. 20, 2020. DOI: 10.3390/en13184665.

PRADO, K. C. A.; OLIVEIRA, A. L. R.; SILVA, S. M. C. E; CARNEIRO, V. A. Gestão e uso de cinzas vegetais provenientes da queima de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras. **Revista Sapiência**, Goiás, v. 328, p. 315–328, 2020.

QUEIROZ, A. J. P. **Análise da degradação e do poder calorífico de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2014.

R Development Core Team (2019): **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, <https://www.rproject.org/>

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. 2014. Escola de Engenharia de São Carlos, [S. l.], 2014.

SETTE JR., C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. S.; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 122, p. 209–213, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.057.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 713, 2015. a. DOI: 10.5380/ufv.v45i4.39700.

TORQUATO, D. E. M. **Estudo de degradação térmica e caracterização de lodos provenientes de diferentes sistemas de tratamento de esgotos**. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2012.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEV, A. C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, [S. l.], v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.

WIDYATMOKO, H. Refuse derived fuel potential in DKI Jakarta. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Univ Trisakti, Fac Landscape Architecture & Environm Technol, Environm Engn Dept, Jakarta, Indonesia FU - Universitas Trisakti FX - Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/106/1/012099>.

CAPÍTULO 4: CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS DE CASCA DE EUCALIPTO E PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O Brasil tem alta disponibilidade de palha de cana-de-açúcar e de casca de eucalipto, biomassas que podem ser utilizadas em caldeiras. Entretanto, a queima das biomassas pode causar impactos e/ou provocar danos nas caldeiras. O objetivo foi avaliar as biomassas: casca de eucalipto e da palha de cana-de-açúcar, bem como identificar suas propriedades físico-químicas e energéticas. Foram feitas as análises: imediata (teor de voláteis, cinzas e carbono fixo); poder calorífico superior (PCS), granulometria, espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e termogravimétrica (TGA). As biomassas apresentaram PCS médio de 18.035 J g⁻¹ (eucalipto) e 18.616 J g⁻¹ (palha), inferiores ao combustível derivado de resíduo (CDR) (18.778 a 32.276 J g⁻¹). A análise EDS das cinzas da casca mostrou oito elementos químicos mais abundantes, enquanto, para a palha, seis foram os elementos em comum (O, Ca, C, K, Mg e P), os quais embora precisem de controle, não impedem a utilização dos materiais como fonte energética. A TGA reforçou que a degradação térmica das duas biomassas e mostrou sua potencialidade energética renovável. Os resultados mostraram que as biomassas podem ser utilizadas em misturas com o CDR a fim de melhorar o PCS das biomassas e auxiliar a compensação de efeitos danosos do CDR na indústria.

Palavras-chave: Misturas. Caldeiras. Caracterização. Cinzas. Efeitos danosos.

ABSTRACT

Brazil has high availability of sugarcane straw and eucalyptus bark, biomasses that can be used in boilers. However, the burning of biomass can cause impacts and/or damage the boilers. The objective was to evaluate the biomasses: eucalyptus bark and sugarcane straw, as well as to identify their physical-chemical and energetic properties. The following analyzes were performed: immediate (volatile, ash and fixed carbon content); higher heating value (HHV), granulometry, energy dispersive spectroscopy (EDS) and thermogravimetric (TGA). The biomasses showed an average HHV of $18,035 \text{ J g}^{-1}$ (eucalyptus) and $18,616 \text{ J g}^{-1}$ (straw), relatively lower than the refuse derived fuel (RDF) ($18,778$ to $32,276 \text{ J g}^{-1}$). EDS analysis of bark ash showed eight most abundant chemical elements, while for straw, six were the elements in common (O, Ca, C, K, Mg and P), which, although they need control, they do not prevent the use of materials as an energy source. TGA reinforced the thermal degradation of the two biomasses and showed their renewable energy potential. The results showed that the biomasses can be used in mixtures with the RDF to improve the HHV of the biomasses and help to compensate the harmful effects of the HHV in the industry.

Keywords: Mixtures. Boilers. Characterization. Ash. Harmful effects.

4.1. Introdução

Segundo o Balanço Energético Nacional da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (EPE, 2021a), 48,4 % da matriz energética brasileira é composta por energias renováveis, tais como: a hidrelétrica (12,6 %), os produtos do bagaço de cana-de-açúcar (19,1 %), a lenha e o carvão vegetal (8,9 %), entre outras (7,7 %).

A biomassa vegetal é composta por materiais orgânicos de origem florestal, agrícola ou de podas urbanas. Entre as biomassas lignocelulósicas, podem ser citadas: arroz (palha e casca), trigo (palha e casca), sorgo (palha), milho (palha), cana (palha e bagaço), eucalipto (casca, galhos e serragem da madeira), capim, entre outros (AREIAS, 2020; GOLDEMBERG, 2017).

Em 2020, no Brasil, a área total de florestas plantadas para fins industriais comportou uma área de 9,5 milhões de hectares, com 7,5 mi ha destinados à plantios de eucalipto, e 1,7 milhões para pinus. (IBÁ, 2021). Contudo, segundo Bragatto (2010), a atividade industrial da eucaliptocultura é responsável por uma proporção considerável de resíduos sob a forma de casca, deixadas em campo e perdem, assim, seu potencial para o uso energético.

A cana de açúcar é outra cultura com grande destaque no Brasil. Segundo a Nota Técnica da EPE (COSTA, A. O. DA, et al., 2021), a área total colhida do setor foi de, aproximadamente, 8,6 mi ha na safra 2020-2021. Desta cultura, a palha de cana é um resíduo pouco aproveitado na geração de energia, e são deixadas no campo (CERVI et al., 2019; HASSUANI et al., 2005).

O objetivo foi realizar a caracterização da casca de eucalipto e da palha de cana-de-açúcar. Os objetivos específicos foram identificar suas propriedades físico-químicas e energéticas, de forma a contribuir à experimentação posterior, em busca de possíveis misturas com o CDR (Combustível Derivado de Resíduos).

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Material

Os materiais utilizados neste estudo foram provenientes de casca de eucalipto, cerca de 10 kg, coletada na fábrica da Eucatex, no município de Salto, estado de SP, no ano de 2021; e de palha de cana de açúcar, cerca de 10 kg, coletada no viveiro de mudas da Universidade Federal de São Carlos, campus de Sorocaba, no ano de 2021.

4.2.2. Preparação das amostras

Em laboratório, as três amostras de casca de eucalipto (200 g, em média) e três amostras de palha de cana (200 g, em média) foram devidamente acondicionadas em bandejas plásticas e encaminhadas para a secagem em estufa, com renovação e circulação de ar (SL-102/27, SOLAB, Brasil) a 103 ± 1 °C, por 24 horas. Após a secagem completa, as amostras de biomassas foram trituradas separadamente com o auxílio de um triturador (TM-05, Lippel, Brasil) e uma peneira, com abertura de 2,4 mm acoplada.

Os materiais triturados foram armazenados em sacos plásticos livres de umidade e, em seguida, lacrados, a fim de conservar suas condições físicas.

4.2.3. Granulometria

A determinação da granulometria foi realizada por meio de peneiramento mecânico, com base na norma ASTM D293M-18 (ASTM, 2010). Para ambas as biomassas, a classificação da granulometria foi feita em triplicata, num total de seis amostras (três para o eucalipto, três para a palha de cana), com o material previamente triturado. Nos ensaios, foram usadas quatro peneiras (BERTEL, Brasil), com abertura de malha progressiva, com a abertura maior de 10 *mesh* (2 mm), e a menor, 100 *mesh* (0,15 mm). O conjunto de peneiras foi instalado em um agitador orbital de peneiras (MA 750, Marconi, Brasil), com batidas intermitentes no topo, a 250 rpm, fixa, durante 10 minutos. Para cada ensaio, foi utilizada uma amostra de 100 g de material.

4.2.4. Densidade a granel

A determinação da densidade a granel (base seca, Equação 6) foi realizada por meio de um recipiente de volume e formato conhecidos, ou seja, em um béquer de 2 L de capacidade, cujas amostras foram inseridas até preencher seu volume. Na sequência, suas massas foram registradas em balança semi-analítica, de duas casas decimais (BL3200H, Shimadzu, Brasil). A determinação foi realizada em triplicata.

$$D_{gr} = \frac{m_{ra} - m_r}{v_r} \quad (6)$$

Onde:

D_{gr} = Densidade a granel ($g\ cm^{-3}$)

m_{ra} = massa do recipiente com amostra (g)

m_r = massa do recipiente (g)

v_r = volume do recipiente (cm^3)

4.2.5. Umidade

A determinação da umidade (Equação 7) foi realizada paralelamente à secagem do material, conforme condições prévias de coleta. As amostras foram colocadas em bandejas de massa conhecida, pesadas e levadas para estufa, com renovação e circulação de ar, (SL-102/27, SOLAB, Brasil) a $103 \pm 1\ ^\circ C$, por 24 horas, até a secagem completa dos materiais e estabilização de suas massas, com base na norma técnica ASTM E871-82 (ASTM, 2019).

$$h(\%) = \frac{(m - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

h = umidade (%);

m = massa inicial (g);

m_s = massa final seca (g)

4.2.6. Análise Imediata

4.2.6.1. Teor de Voláteis

O teor de voláteis (materiais que evaporam facilmente) (Equação 8) foi determinado com base na norma ASTM E872-82 (ASTM, 2019). Foram colocados aproximadamente 2,0 g dos materiais secos em cadinhos de porcelana, calcinados e com tampa de massa conhecida (12 g, em média), sempre com as amostras em triplicata. Em seguida, foram pesados em balança analítica (AUY220, Shimadzu, Japão) e levados para o forno tipo mufla (LF00212, JUNG,

Brasil) a 950 °C, onde ficaram por três minutos sobre a porta do forno aberta e sete minutos seguintes dentro, com a porta fechada. Posteriormente, os cadinhos foram resfriados em dessecador com sílica, pesados e determinados.

$$TV (\%) = \frac{(m_{is} - m_{fs})}{m_{as}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

TV = Teor de voláteis (%);

m_{is} = massa do cadinho mais amostra inicial seca (g);

m_{fs} = massa do cadinho mais amostra final seca (g)

m_{as} = massa da amostra seca (g)

4.2.6.2. Teor de Cinzas

O teor de cinzas (resíduos da combustão) (Equação 9) foi determinado, em triplicata, com base na norma ASTM D1102-84 (ASTM, 2021). Os cadinhos de porcelana (previamente calcinados) foram pesados, adicionados 2,0 g de material e levados ao forno-mufla, à 600 °C, por seis horas. Posteriormente, foram resfriados em dessecador com sílica, e pesados em temperatura ambiente.

$$TC_z (\%) = \frac{(m_{cr} - m_c)}{m_{as}} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

TC_z = Teor de cinzas (%);

m_{cr} = massa do cadinho mais o resíduo após a combustão (g);

m_c = massa do cadinho (g)

m_{as} = massa da amostra seca (g)

4.2.6.3. Teor de Carbono Fixo

O carbono fixo foi determinado ao se subtrair 100 % da soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas (Equação 10).

$$TCO_f (\%) = 100 - (TC_z + TV) \quad (10)$$

Onde:

TCO_f = Teor de carbono fixo (%);

TC_z = Teor de cinzas (%);

TV = Teor de voláteis (%)

4.2.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / Espectroscopia Eletrônica de Varredura (EDS)

Para a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia eletrônica de varredura (EDS), foram utilizadas as cinzas das amostras, em triplicata. Essas cinzas foram analisadas via MEV (TM 3000, Hitachi, Estados Unidos da América), a fim de caracterizar estruturalmente e semiquantitativamente os elementos químicos que as compõem.

Posteriormente, as amostras em triplicata foram fixadas em suporte metálico sobre fita adesiva dupla face de carbono. A tensão aplicada de aceleração foi de 15 kV, característico do equipamento. Um padrão pré-estipulado de intensidade foi adotado, a fim de identificar os elementos nos gráficos gerados para o EDS. Somente os picos maiores ou iguais à 0,4 cps/ev (contagens por segundo por elétron-volt) foram levados em consideração ao longo do espectro de 0 a 10 keV (kilo-elétron-volt).

4.2.8. Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado com base na norma (ASTM D5865-13) (ASTM, 2014). Para a realização dessas análises, foram avaliadas as amostras de 1 g, em duplicata, por um calorímetro (C200, IKA, China).

4.2.9. Análises Termogravimétricas (TGA)

As análises termogravimétricas (TGA) nas amostras, em triplicata, usaram TGA (Pyris1, Perkin Elmer, Estados Unidos da América) (Figura 45) em temperatura inicial ambiente (considerando temperatura ambiente = 30 °C) e temperatura final igual à 750 °C, com atmosfera de ar sintético e fluxo de 20 mL m⁻¹ e taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹.

4.2.10. Processamento e análise dos dados

Os dados das coletas das amostras foram digitados em planilhas eletrônicas, assim como médias e desvios-padrão também foram feitas. Outros dados foram levantados em softwares específicos dos equipamentos utilizados: TM 3000, v. 02-03-02 (Hitachi, 2002), Quantax, v. 70 (Hitachi, 2002), Pyris Thermal Analysis System, v. R13.1.1 (Pyris, 2002). As imagens foram obtidas a partir de softwares específicos do MEV (TM 3000, v. 02-03-02 (Hitachi, 2002)).

4.2.11. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas respeitando os pressupostos de homogeneidade de variância e de normalidade dos resíduos, verificados pelo teste de Bartlett e de Shapiro-Wilk, respectivamente. Os dados obtidos para as biomassas de densidade a granel, umidade, análise imediata e poder calorífico superior, foram submetidos ao teste *t-Student*. O referido teste foi usado em vez de ANOVA ao comparar apenas dois tratamentos para cada variável. Todos os testes foram calculados com o *software* R versão 3.1.3 (R Core Team, 20150).

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Granulometria

A Tabela 11 apresenta a classificação granulométrica média das amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar.

Tabela 11 - Valores médios para classificação granulométrica (%) das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar e seus respectivos desvios-padrão

Peneiras		% média retida por peneira	
Tyler (Mesh)	Abertura (mm)	Casca de eucalipto	Palha de Cana
10	2,00	20,36 ± 3,83	9,51 ± 0,97
20	0,84	41,85 ± 10,6	38,37 ± 15,37
40	0,42	11,55 ± 4,06	26,65 ± 9,38
100	0,15	15,65 ± 2,75	21,36 ± 1,74
Fundo	< 0,15	10,58 ± 0,33	4,12 ± 0,36
Total	-	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2022)

A casca de eucalipto triturada apresentou granulometria mais heterogênea do que a palha de cana-de-açúcar triturada (Tabela 11), uma vez que, 30% das partículas da casca de eucalipto foram classificadas em diâmetro $> 10 \text{ mesh}$ ou diâmetro $< 100 \text{ mesh}$; enquanto isso, 70% das partículas estão na classificação $10 > \text{diâmetro} > 100 \text{ mesh}$. Já para a palha, 87% de suas partículas ficaram concentradas com diâmetro entre 10 a 100 *mesh* e, apenas 13% fora deste intervalo.

Os valores obtidos neste estudo se mostraram de acordo com os encontrados em literatura e confirmam a heterogeneidade da granulometria de ambas as biomassas. Sette Jr. et al. (2018), ao avaliarem a casca de eucalipto triturada também, observaram maior retenção de material (70% das partículas) na peneira de 20 *mesh* ou 0,84 mm. Para a palha de cana-de-açúcar, Silva et al. (2015), relataram maiores concentrações de material entre 20 e 10 *mesh* (0,84 e 1,75 mm). Segundo Chrisostomo (2011), a dimensão das partículas pode influenciar na densidade do material, sendo as biomassas com maior proporção de partículas maiores, aquelas com menor densidade. Desta forma, a granulometria pode auxiliar na análise das dimensões dos materiais em busca do sucesso da compactação das biomassas.

4.3.2. Densidade a Granel

A Tabela 12 apresenta a densidade a granel, obtido a partir das médias aritméticas das triplicatas, e seus respectivos desvios-padrão, das biomassas casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar.

Tabela 12 - Valores médios para a densidade a granel da palha de cana e casca de eucalipto e seus respectivos desvios-padrão

Material	Densidade (kg m ⁻³)	p-valor
Casca de Eucalipto	125,12 ± 0,74	0,001704
Palha de Cana	111,81 ± 0,25	

Teste t-Student para amostras independentes; $p < 0,05$

Fonte: Próprio autor (2022)

A casca de eucalipto e a palha de cana, se mostraram como biomassas de baixa densidade (Tabela 12), o que faz necessária uma maior quantidade de partículas, a fim de produzir a mesma quantidade de energia, quando comparadas à outros produtos de mesma origem vegetal, tais como a madeira de eucalipto e o bagaço da cana. Como esperado, devido às suas características, a densidade a granel das biomassas estudadas apresentaram resultados que diferiram estatisticamente entre si.

Segundo Foelkel (2010), a casca de eucalipto possui baixa densidade básica, $d = 240 - 400 \text{ kg m}^{-3}$ (massa seca por massa saturada de água), por ser mais porosa e menos fibrosa nas camadas internas vivas da biomassa, enquanto a da madeira, varia entre 400 a 600 kg m^{-3} , dependendo da espécie. Filho (2020) relata a densidade a granel da casca como sendo entre 50 e 120 kg m^{-3} , de acordo com seu aspecto fibroso. Sette Jr. et al. (2018) encontraram, uma densidade a granel de 250 kg m^{-3} , valor superior ao observado neste trabalho. Confirmando o aspecto de que a casca de eucalipto se faz uma biomassa com volume considerável por unidade de massa. Os valores obtidos para a palha de cana foram semelhantes aos encontrados por Carvalho (2012), 64 kg m^{-3} , que também relata 12 kg m^{-3} de diferença entre a densidade a granel da palha e do bagaço. Também pode-se considerar que as variações partindo de um mesmo material genético podem estar atreladas ao ambiente onde ela foi inserida e foi cultivada.

Segundo Chrisostomo (2011), a baixa densidade dificulta a utilização desses materiais como combustível e ainda indica que sua compactação, sob a forma de briquetes, pode melhorar a qualidade do combustível sólido para a geração de energia. Por possuírem baixas densidades, o transporte e o armazenamento desses materiais acabam por ser mais caros que o de resíduos mais densos, devido à necessidade de maior área para comportar os materiais descompactados.

Quando se compara a densidade a granel das biomassas *in natura* com a de briquetes de biomassas, há um aumento considerável na densidade e, conseqüentemente, há redução de volume. Silva et al. (2015) relataram redução de 4,6 a 14,3 vezes no volume de biomassa, como consequência do processo de briquetagem e no aumento da densidade, com escala variável, dependente da granulometria trabalhada, sendo a briquetagem uma alternativa para o reaproveitamento das biomassas.

4.3.3. Umidade

A Tabela 13 apresenta a umidade (base seca) (%) das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar.

Tabela 13 - Valores médios para a umidade (base seca) (%) das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar e seus respectivos desvios-padrão

Material	Umidade (base seca) (%)	p-valor
Casca de Eucalipto	13,20 ± 0,14	0,002693
Palha de Cana	11,05 ± 0,07	

Teste t-Student para amostras independentes; $p < 0,05$

Fonte: Próprio autor (2022)

O teor de umidade interfere diretamente no poder calorífico superior do material, uma vez que há maior necessidade de energia para o início da ignição e a redução do calor liberado por ele. A casca de eucalipto mostrou ter um teor médio de (13,20 %) (Tabela 14).

Rodrigues (2018), ao verificar o efeito da pirólise da casca de eucalipto, apontou que o seu teor de umidade se localiza na faixa de 40 %, valor relativamente alto para combustíveis, uma vez que valores acima de 50 % de umidade não são recomendáveis, a fim de não comprometer a eficiência energética do processo (KLAUTAU, 2008).

A palha de cana apresentou menor teor de umidade (11,05 %) em relação a casca de eucalipto (13,20 %) (Tabela), com valores maiores aos observados em literatura. Pires (2017), ao trabalhar com a produção e a caracterização de *biochar* de palha de cana-de-açúcar, relatou teor de umidade próximo a 8,80%. Por outro lado, Santos (2018), apontou o teor em torno de 9,10%, e também ressaltou que o teor de umidade não consiste em um componente estrutural da biomassa, por isso pode ser influenciado pelas condições de armazenamento do material. Portanto, para a geração de calor, é relevante que as biomassas, após a secagem, sejam devidamente armazenadas (livres de umidade), para que não estejam sujeitas à perda de eficiência energética durante a combustão.

4.3.4. Análise Imediata

A Tabela 14 apresenta as médias aritméticas e respectivos desvios-padrão (triplicatas) das amostras das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar.

Tabela 14 - Análise imediata (média aritmética e desvios padrão das triplicatas) das amostras das biomassas de casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar

Material	Teor de Voláteis (base seca) (%)	p-valor	Teor de Cinzas (base seca) (%)	p-valor	Teor de carbono fixo (%)	p-valor
Casca de Eucalipto	82,95 ± 0,68	0,1363	1,57 ± 0,30	0,1768	15,47 ± 0,38	0,002343
Palha de cana	86,03 ± 1,66		4,10 ± 1,71		9,85 ± 0,05	

Teste t-Student para amostras independentes; $p < 0,05$

Fonte: Próprio autor (2022)

Ao comparar as duas biomassas (Tabela 14), tem-se que tanto a casca de eucalipto quanto a palha de cana-de-açúcar são compostas, majoritariamente, de materiais voláteis, em que a palha de cana teve maior proporção relativa aproximada (86%), valor similar ao obtido por Conz (2015), e 6% maior do que o valor relatado por Pires (2017), (80%).

Já a casca de eucalipto, por sua vez, pode apresentar diferentes valores de voláteis, dependendo da espécie utilizada (BRITO; BARRICHELO, 1978). Nesse caso, o teor obtido para a casca (83%) difere aproximadamente cinco unidades do teor relatado por Rodrigues (2018), (88%). No entanto, pode-se verificar que os resultados encontrados aqui, não diferiram estatisticamente.

O material volátil consiste na porção da massa inicial, composto por materiais lábeis (pouco estáveis), perdidos durante a pirólise, cujo aumento de temperatura favorece a redução e a perda dessa fração do material (JOSEPH et al., 2009). Segundo McKendry (2002), o teor de voláteis também pode representar uma medida da facilidade com que a biomassa pode ser inflamada, a fim de determinar a sua utilização como fonte de energia.

Quanto ao teor de cinzas, parte do material pode estar diretamente relacionado com a presença de substâncias inorgânicas (POLASTRELI, 2019). Nas duas biomassas, a fração de cinzas apresentou baixa representatividade (Tabela 14), inferior aos teores de voláteis e carbono fixo. Nota-se que os resultados encontrados, apesar das variações, também não diferiram estatisticamente. Segundo Foelkel (2010), a casca de eucalipto é riquíssima em minerais, com cerca de 3 a 10% do seu peso composto por minerais, sob a forma de cinzas. Pires (2017), ao trabalhar com a pirólise da palha de cana, encontrou 4,88% do teor de cinzas para a palha seca, com possibilidade de aumento, em caso de carbonização parcial do material.

Dentre os fatores capazes de influenciar a variação do teor de cinzas, o tipo de colheita realizado é importante: a colheita mecanizada é muito mais favorável ao aumento de cinzas do que a manual, devido à menor contaminação da terra envolvida na retirada dos resíduos em campo (LUIS; JACOME, 2014; NAKASHIMA, 2016). Nesse aspecto, ambos os materiais trabalhados estão sujeitos a essa variação de acordo com o tipo de colheita.

O carbono fixo é o elemento em forma mais resistente, e que permanece na estrutura da biomassa, após a volatilização. Seu teor está diretamente relacionado a quantidade de calor gerado na combustão (AMONETTE; JOSEPH, 2009; RODRIGUES, 2018; YANG et al., 2006). Nas biomassas, a casca de eucalipto apresentou média de proporção relativa maior (15,47%), em relação à cana (9,85%). Valores que diferiram estatisticamente entre si.

Guimarães Neto (2017) relatou a variação de carbono fixo entre 17,63% e 24,12%, para diferentes espécies de eucalipto, diferente de Brito e Barrichelo (1978), que apontaram o intervalo de 14,4% a 17,7%.

Na palha de cana, Conz (2015) relatou carbono fixo nulo, com aumento gradual em caso de pirólise da biomassa, para produção de biocarvão, o que indica a carbonização parcial da biomassa como uma alternativa, em casos cujo objetivo final seja a obtenção e uso do carbono fixo. Todavia, Pires (2017) encontrou 15,12% de teor de carbono médio da palha, divergente em relação ao presente trabalho.

Diante do exposto, pode-se supor, portanto, que tanto palha de cana quanto casca de eucalipto também podem ser considerados materiais heterogêneos, devido às suas próprias características físico-químicas conforme a espécie, bem como também, às formas de retirada do campo. A produção de misturas entre CDR e as referidas biomassas pode ser uma alternativa para melhorar a homogeneização e otimizar o uso da palha de cana e da casca de eucalipto como fonte de energia térmica.

4.3.5. Poder Calorífico Superior (PCS)

A Tabela 15 apresenta as médias aritméticas e respectivos desvios-padrão (duplicata) do Poder Calorífico Superior (PCS) das biomassas: casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar.

Tabela 15 - Valores médios para o Poder Calorífico Superior da palha de cana-de-açúcar e casca de eucalipto e seus respectivos desvios-padrão

Material	PCS (J g⁻¹)	p-valor
Casca de Eucalipto	18.035 ± 7,07	0,09218
Palha de Cana-de-açúcar	18.616 ± 119,50	

Teste t-Student para amostras independentes; p < 0,05

Fonte: Próprio autor (2022)

Os resultados encontrados para o eucalipto (18.035 J g⁻¹) (Tabela 15) foram próximos aos encontrados na literatura, variável entre 16.630 J g⁻¹ (SHENG; AZEVEDO, 2005) a 18.520 J g⁻¹ (CHUN-YANG, 2011). Na palha de cana, o valor encontrado (18.616 J g⁻¹) (Tabela 15) foi maior que o valor da literatura (15.630 J g⁻¹, SILVA et al., 2015; 17.490 J g⁻¹, PADILLA et

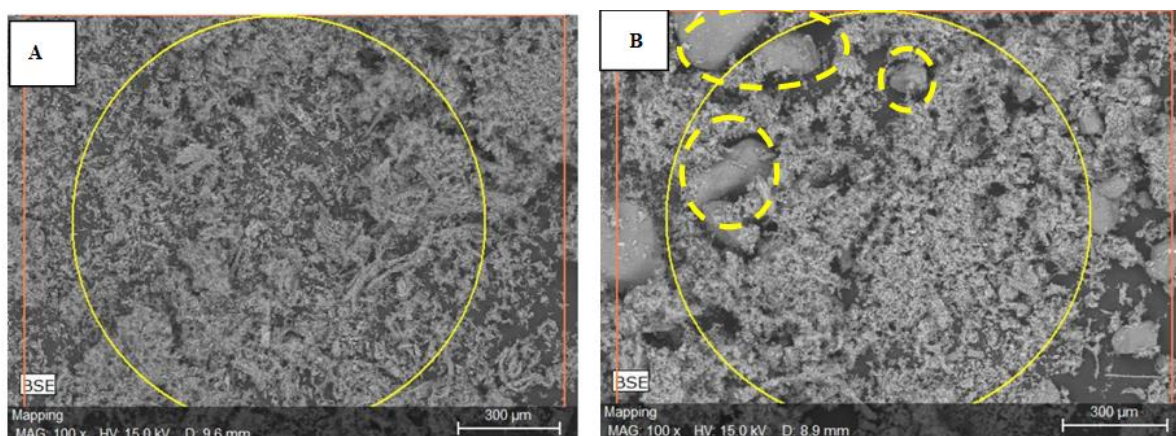
al., 2016). Pode-se verificar, portanto, que os valores encontrados não diferiam estatisticamente entre si e ambos têm potencial energético considerável.

Os resultados e os valores da literatura mostram que diversos fatores podem influenciar o poder calorífico de um material, bem como o teor de umidade, de voláteis, cinzas e carbono fixo, o que permite classificar a qualidade dos diferentes tipos de biomassas como combustíveis, conforme seu potencial energético (GUIMARÃES NETO, 2017).

4.3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

Os elementos e estruturas mais representativos nas cinzas da casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar puderam ser observados a partir de imagens obtidas por MEV, com aumento de 100 x (Figura 40). As partículas representadas variaram em tamanho na relação 1-300 μm . Círculos em linha amarela contínua representam partículas menores. Círculos em linha amarela tracejada representam partículas maiores.

Figura 40 – Cinzas da casca de eucalipto (A) e palha de cana (B), medidas em Sorocaba, em 2020



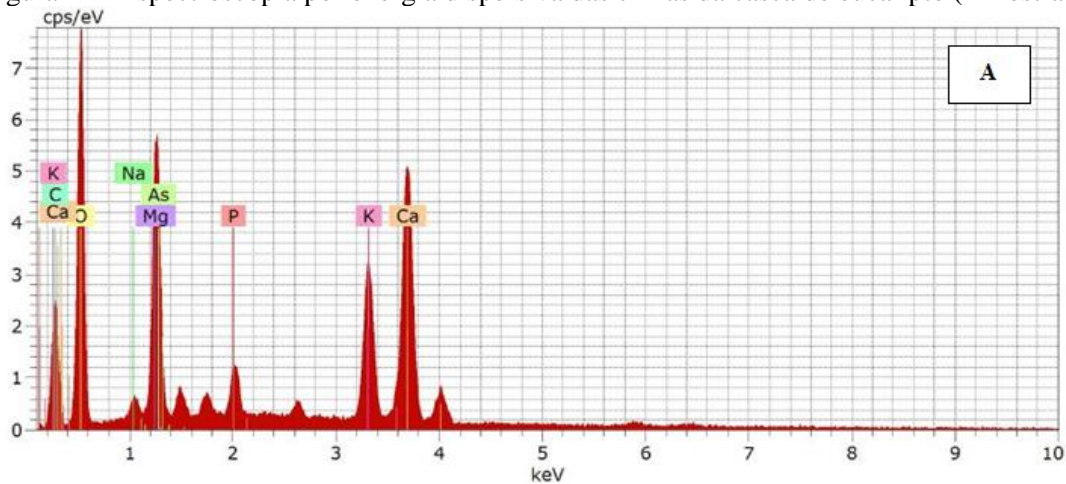
Fonte: Próprio autor (2022)

Nas cinzas da casca de eucalipto (Figura 40 A), é possível identificar a presença de partículas menores, com estruturas fibrosas, que permaneceram, mesmo após a queima completa da biomassa. Já na palha da cana (Figura 40 B), foi notável a presença de estruturas globulares, possivelmente partículas de silicato.

A média dos dados das cinzas de casca de eucalipto, extraídas e avaliadas pelo EDS, permitiu identificar oito elementos mais abundantes (Figura 41, Tabela 16). Já a palha de cana,

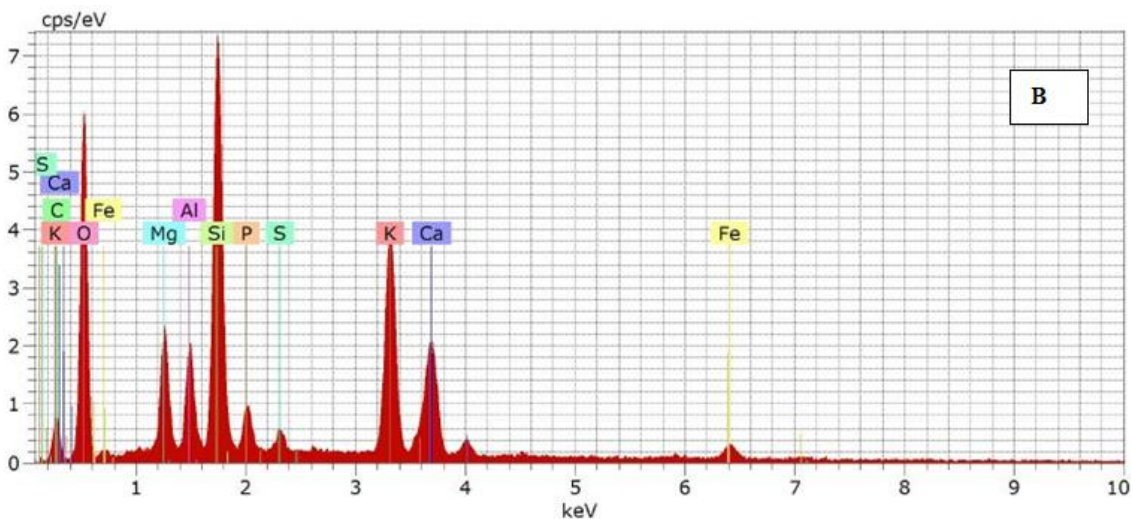
apresentou dez elementos mais abundantes (Figura 42, Tabela 16), dois elementos a mais do que o eucalipto, com seis elementos (O, Ca, C, K, Mg e P) encontrados em ambos os materiais.

Figura 41 - Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas da casca de eucalipto (Amostra A)



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 42 – Espectroscopia por energia dispersiva das cinzas da palha de cana-de-açúcar (Amostra B)



Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela 16 – Elementos e porcentagem média encontrados nos materiais de biomassa de casca de eucalipto e palha de cana via EDS, medidos em Sorocaba, em 2022.

Elemento químico	Casca de Eucalipto (%)	Palha de Cana (%)
O	51,6	47,3
Ca	17,4	7,0
C	13,5	8,5
K	7,2	11,7
Mg	6,3	4,4
P	1,3	1,6
Ar	1,8	0
Na	0,8	0
Si	0	12,7
Al	0	3,4
Fe	0	2,5
S	0	0,8

Fonte: Próprio autor (2022)

A predominância da identificação do Oxigênio tanto no eucalipto quanto na cana se deve à formação de óxidos, que mesmo após a queima da biomassa, permanecem nas cinzas, elementos também importantes à possíveis danos em caldeiras, mesmo que em proporções diferentes.

Além disso, outros elementos importantes quanto à danos em caldeiras podem ser encontradas. Assim, ao analisar a Tabela 16, para a casca de eucalipto, pode-se observar a predominância de Cálcio (17,40%), Carbono (17,40%), Potássio (7,20%) e Magnésio (6,30%) e para a palha de cana: Silício (12,70%), Potássio (11,70%), Carbono (8,5%) e Cálcio (7,00%). Apesar das características próprias, pode-se supor também que não impedem a possibilidade da composição, por extrusão, de misturas entre o CDR e as biomassas em busca de melhorar o PCS da biomassa vegetal e ao mesmo tempo, compensar possíveis efeitos danosos que podem ser causados na caldeira quando da incineração de parte de resíduos plásticos presentes.

Neto (2017), ao comparar a madeira e casca de diversos clones de eucalipto, obteve teor médio de oxigênio de 43,8% e de carbono, 45,8%; frações bastante representativas, considerando o uso da casca *in natura*, assim como em Rodrigues (2018), com os teores de oxigênio e carbono: 47,6% e 44,6%, respectivamente.

Para a palha de cana, a presença de silício nas cinzas está relacionada à estrutura da própria biomassa. Segundo Hassuani, Leal e Macedo (2005), gramíneas de rápido crescimento, como a cana-de-açúcar, apresentam alta concentração de sílica, responsável pela manutenção de sua estrutura. A presença de sílica também foi relatada por Nakashima (2016), que apontou a contaminação de terra durante a retirada da palha como uma das causas do aumento da sílica na composição de sua biomassa.

Segundo Sampaio, (2014), o cálcio, o potássio e o sódio podem causar incrustações nas grelhas, causar sinterização de material e, conseqüentemente a parada emergencial da caldeira, gerando possíveis prejuízos para as indústrias, uma vez que o funcionamento da caldeira é constante.

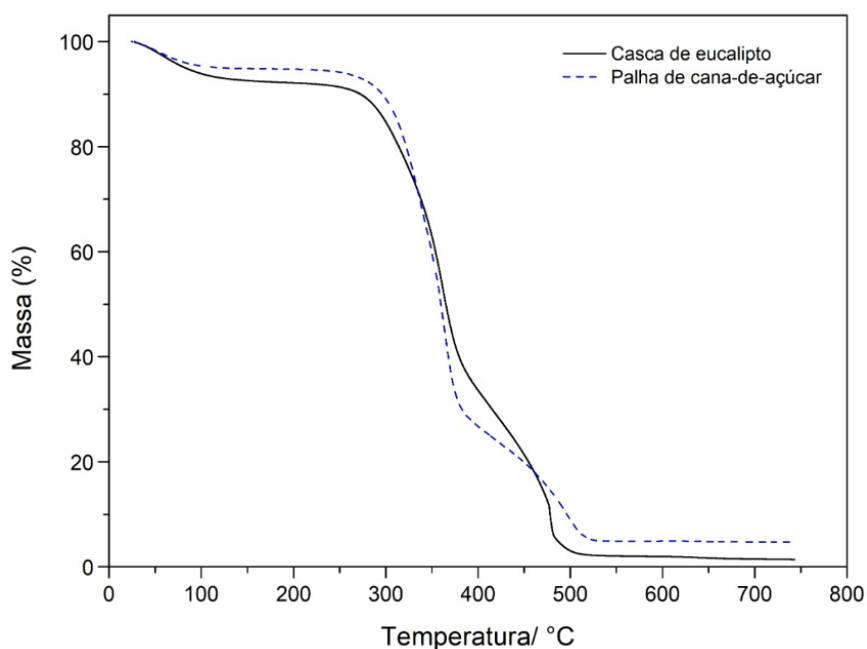
Vassilev et al. (2010), ao estudar biomassas como fonte de energia, destacou a presença de elementos como cálcio, potássio, silício e magnésio, alumínio, enxofre, ferro, fósforo, cloro e sódio nas cinzas, o que também aconteceu neste trabalho, sobretudo com a palha de cana.

A casca de eucalipto e a palha de cana se mostraram potenciais biomassas a serem usadas também na cogeração de energia.

4.3.7. Análise Termogravimétrica (TGA)

As Figuras 43 e 44 apresentam as análises termogravimétricas da casca de eucalipto e da palha de cana-de-açúcar.

Figura 43 – Curvas de TG de amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min⁻¹

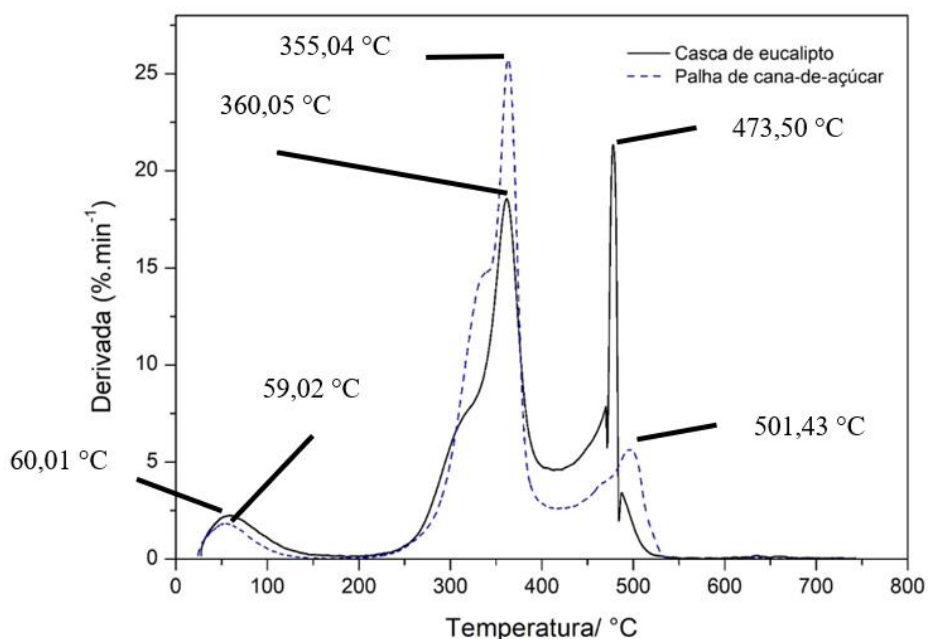


Fonte: Próprio autor (2022)

É possível observar, nas curvas de TG (Figura 43) que, tanto a casca de eucalipto quanto a palha de cana-de-açúcar apresentaram seu material quase totalmente degradado antes dos 600

°C, com degradação máxima desses materiais a 98,19 % e 97,44 %, respectivamente. Esse comportamento reforça as tradicionais três faixas de degradação da celulose, hemiceluloses e lignina, presentes nas biomassas, e a degradação reduzida, após a faixa de perda desses componentes. De acordo com Higuchi et al. (2015), a primeira perda de massa está relacionada à perda de umidade, entre 25 °C a 100 °C, seguida pela perda das hemiceluloses (150 °C a 350 °C) e celulose (275 °C a 350 °C), enquanto a lignina se decompõe, gradativamente, na faixa de 250 °C a 500 °C até a estabilização. O material não degradado após o término da análise pode ser considerado como cinzas, cujo teor está diretamente relacionado com a qualidade do combustível (GUIMARÃES NETO, 2017). Ainda nas curvas de TG (Figura 43), pode-se notar que os teores de cinzas encontrados para a palha de cana e casca de eucalipto, são praticamente equivalentes aos levantados na análise imediata: 4,10 % e 1,57%, respectivamente (Tabela 14, página 106).

Figura 44 – Curvas de DTG de amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar em atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml min⁻¹ e razão de aquecimento de 20 °C min⁻¹



Fonte: Próprio autor (2022)

Na Figura 44 e na Tabela 17, é possível observar as temperaturas em que se concentram os eventos de perda de água (T degrad.1) e degradação dos principais componentes lignocelulósicos das biomassas (T degrad.2 e T degrad.3), bem como seus picos, que podem ser considerados como uma medida de reatividade do combustível, de modo que os combustíveis que apresentaram os maiores picos de degradação em temperaturas mais baixas

são considerados mais reativos (DARVELL et al., 2010). Marques et al. (2022) relataram, para a palha da cana-de-açúcar, uma primeira perda de massa a 100 °C, caracterizada como perda de água; a segunda, a 350 °C, com degradação da celulose e hemicelulose; e a última, a 500 °C, a degradação da lignina. Rodrigues (2018) divide o processo de degradação térmica da casca de eucalipto em quatro fases: liberação de água (fase 1), até 127 °C; liberação de voláteis (fase 2), em torno de 177 °C; degradação da hemicelulose e celulose, e em menores proporções lignina (fase 3), até 477 °C; reações secundárias do carvão (fase 4), acima de 477 °C.

Tabela 17 - Valores das temperaturas obtidas a partir da análise termogravimétrica das amostras de casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar

Biomassas	T inicial (°C)	T final (°C)	T degrad.1 (°C)	T degrad.2 (°C)	T degrad.3 (°C)
Casca de Eucalipto	293,20	481,70	60,01	360,05	473,50
Palha de Cana-de-açúcar	306,64	534,63	59,02	355,04	501,43

Fonte: Próprio autor (2022)

Os resultados obtidos para a degradação térmica de ambas as biomassas no presente trabalho estão de acordo com os observados em literatura, o que mostra a casca de eucalipto e a palha da cana-de-açúcar como potenciais fontes de geração de energia renovável, tendo em vista seus picos de perda de massa e a temperatura em que os mesmos se sucederam.

4.4. CONCLUSÃO

Em geral, tanto a casca de eucalipto quanto a palha da cana-de-açúcar demonstraram potencial como fonte de energia renovável. O alto teor de umidade e a baixa densidade, são pontos críticos e devem ser considerados para melhorar a qualidade do combustível sólido.

O teor de cinzas (matéria inorgânica) pode variar dependendo do processo de colheita e do processo de queima (pode resultar em queima parcial das biomassas, gerando maior teor de cinzas). O poder calorífico desses materiais está diretamente relacionado como os teores de água, voláteis, cinzas e carbono fixo, o que permite classificar a qualidade dos diferentes tipos de biomassas como combustíveis, conforme seu potencial energético.

4.5. Referências

- AMONETTE, F. E.; JOSEPH, S. **Characteristic of biochar: Microchemical properties**. In: Lehmann, J.; Joseph, S. *Biochar for Environmental Management – Science and Technology*, London: Earthscan, Cap.3, p.33-43. 2009.
- AREIAS, A. A. **Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- ASTM D1102-84, ASTM. **Standard Test Method for Ash in Wood** 2021.
- ASTM D293M-18. ASTM. **Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke** 2010.
- ASTM D5865-13. ASTM. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke** 2014.
- ASTM E871-82. **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.
- ASTM E872-82. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.
- BRAGATTO, J. **Avaliação do potencial da casca de Eucalyptus spp. para a produção de bioetanol**. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Fisiologia e Bioquímica de Plantas), Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E. **Características do eucalipto como combustível: Análise química e imediata da madeira e da casca**. IPEF, v. 16, p. 63-78, 1978.
- CARVALHO, D. M. **Caracterização físico-química e polpação etanol/soda do bagaço e da palha de cana-de-açúcar**. 166 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, 2012.
- CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; VAN DER HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, n. February, p. 391–399, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.001.
- CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- CHUN-YANG, Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses, **Fuel** 90, 1128-1132, 2011.

CONZ, R. F. **Caracterização de matérias primas e biochars para aplicação na agricultura**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz”. Piracicaba, SP. 133p., 2015.

COSTA, A. O. DA, et al. **NT-Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2020>, 2021. /. Acesso em: 23 jul. 2021.

DARVELL, L.I.; JONES, J.M.; GUDKA, B.; BAXTER, X.C.; SADDAWI, A.; WILLIAMS, A.; MALMGREN, A. Combustion properties of some power station biomass fuels. **Fuel**, v. 89, p. 2881-2890, 2010.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico588/BEN_Síntese_2020_PT.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.

FILHO, A. D. M. F. **Viabilidade de queima de casca de eucalipto em fornos de cimento**. 80p. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto : Aspectos morfológicos , fisiológicos , florestais, ecológicos e industriais , visando a produção de celulose e papel. **Eucalyptus Online Book e Newsletter**, [S. l.], p. 109, 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3zI8zYO>. Acesso em: 23 jul. 2021.

GOLDEMBERG, J. Current and Prospects in the Use of Biomass for Energy Generation. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 15–28, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170004.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Potencialidade de uso bioenergético da madeira e da casca de *Eucalyptus* spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de curta rotação**. Tese de doutorado–Universidade Federal de Lavras. 110 p., 2017.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. Geração de energia por biomassa: Bagaço e palha de cana-de-açúcar. In: **Série caminhos para Sustentabilidade**. Piracicaba, PNUD-CTC. 2005.

HIGUCHI, L. A., RUEDA-ORDÓÑEZ, Y. J., TANNOUS, K. (2015). **Comparativo da cinética de decomposição térmica da palha de cana-de-açúcar em atmosfera oxidante e inerte**. In XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. (p. 6). Campinas, SP.

IBÁ. **Relatório anual IBÁ. Ano base 2021**. Indústria brasileira de árvores. Associação Brasileira de Árvores, [S. l.], p. 93, 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3cWxE9f>>. Acesso em: 30 jul. 2022.

JOSEPH, S. et al. Developing biochar classification and test methods. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S.(Ed). **Biochar for environmental management science and technology**. New York: Earthscan, p. 107-126. 2009.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Co-corrente Para Secagem de Grãos**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba, 2008.

LUIS, D.; JACOME, F. **Caracterização Físico-química das Cinzas de Palha de Cana-de-Açúcar Através de Análises Térmicas Simultâneas (STA)**. 2014. Universidade Estadual de Campinas, 2014.

MARQUES, C. A. SILVA, D. A. APRESENTAÇÃO, M. J. F. NAKASHIMA, G. T. YAMAJI, F. M.. **Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (Saccharum sp.)**. Research, Society and Development, v.11, n.1, p. e31211124675, 2022.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass**. Bioresource technology. v. 83, n. 1, p. 37–54, 2002.

NAKASHIMA, G. T. **Use of sugarcane trash for solid biofuel production: physicochemical characterization and influence of storage time**. 2016, p 59. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2016.

PADILLA, E. R. D., et al. **Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar**. Revista Virtual de Química, v. 8, n. 13, p. 1334-1346, 2016.

PIRES, I.C.S.A. **Produção e caracterização de biochar de palha de cana-de-açúcar (Saccharum sp.)** 45 p. Tese (Mestrado em Ciências dos Materiais), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba 2017.

POLASTRELI, D. L. **Caracterização química de biocarvão proveniente da casca de eucalipto da espécie “Eucalyptus grandis” em diferentes condições de pirólise**. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde. Alegre- ES, 2019.

R Development Core Team (2019): **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, <https://www.rproject.org/>

RODRIGUES, L. D. **Contribuições para o estudo da pirólise da casca de eucalipto**. 73 p. 2018. Tese (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, 2018.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. 2014. Escola de Engenharia de São Carlos, [S. l.], 2014.

SANTOS, A.M. **Caracterização química da biomassa: potencial da palha da cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração**. 63 p. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2018.

SETTE JR., C. R. et al. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 209–213, 15 out. 2018.

SETTE JR., C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. S.; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 122, p. 209–213, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.057.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy** 28, 499-507, 2005.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 713, 2015. a. DOI: 10.5380/ufv.v45i4.39700.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEV, A. C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, [S. l.], v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy and Fuels**, v. 20, p. 388-393, 2006.

CAPÍTULO 5: PRODUÇÃO DAS MISTURAS DE CDR COM AS BIOMASSAS CASCA DE EUCALIPTO E PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O combustível derivado de resíduos (CDR), caracterizado como parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é a sobra do processo de reciclagem de resíduos ainda não descartados em aterros. A indústria cimenteira já utiliza o CDR *in natura* como parcela de fonte alternativa de combustível para a redução da emissão de CO₂. O objetivo foi investigar a produção de misturas, por meio de aglutinação e/ou extrusão do CDR com palha de cana-de-açúcar e do CDR com casca de eucalipto para otimizar seus aproveitamentos energéticos. Foram produzidos por meio do processo de extrusão sete tratamentos do tipo *flakes* (grânulos de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos): T1 (100% CDR), T2 (90% CDR e 10% casca), T3 (75% CDR e 25% casca), T4 (50% CDR e 50% casca), T5 (90% CDR e 10% palha), T6 (75% CDR e 25% palha) e T7 (50% CDR e 50% palha) e seis tratamentos do tipo pedaços (material compactado de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos), seguindo as mesmas proporções (de T2 a T7). Os resultados mostraram que as densidades do tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) foram, aproximadamente, 10 vezes maior que CDR (*in natura*). A umidade do tratamento *flakes* (CDR com casca), comparada à casca, alcançou uma redução de 83%. O poder calorífico superior (PCS) do tratamento (CDR com casca) foi 30% superior à casca. Os resultados indicaram a possibilidade real de produção de misturas entre CDR e biomassas, via processo de extrusão. O resultado é um combustível sólido de melhor qualidade: mais homogêneo, menor umidade, maior PCS e maior facilidade para estoque e manuseio.

Palavras-chave: Biomassas. Cimenteira. Extrusão. *Flakes*. Pedaços. Misturas. Polímeros.

ABSTRACT

Refuse derived fuel (RDF), characterized as part of municipal solid waste (MSW), is the leftover from the recycling process of waste not yet disposed of in landfills. The cement industry already uses RDF in natura as part of an alternative source of fuel to reduce CO₂ emissions. The objective was to investigate the production of mixtures, through agglutination and/or extrusion of RDF with sugarcane straw and RDF with eucalyptus bark to optimize their energy use. Seven flakes-type treatments were produced through the extrusion process (granules of mixtures of RDF with undefined biomasses and formats): T1 (100% RDF), T2 (90% RDF and 10% bark), T3 (75% RDF and 25% bark), T4 (50% RDF and 50% bark), T5 (90% RDF and 10% straw), T6 (75% RDF and 25% straw) and T7 (50% RDF and 50% straw) and six pieces-like treatments (compacted material from mixtures of RDF with undefined biomass and formats), following the same proportions (from T2 to T7). The results showed that the density of the treatment produced in flakes format (RDF with straw) was approximately 10 times greater than RDF (in natura). The moisture of the flakes treatment (RDF with bark), compared to the bark, achieved a reduction of 83%. The higher heating value (HHV) of the treatment (RDF with bark) was 30% higher than the bark. The results indicated the real possibility of producing mixtures between RDF and biomass, by extrusion process. The result is a better quality solid fuel: more homogeneous, lower humidity, higher HHV and easier storage and handling.

Keywords: Biomasses. Cement plants. Extrusion. Flakes. Pieces. Mixtures. Polymers.

5.1.Introdução

O combustível derivado de resíduos (CDR), caracterizado como parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é a sobra do processo de reciclagem de resíduos ainda não descartados em aterros (ÂRINA et al., 2020). O CDR é composto, predominantemente, por polímeros, os quais possuem alto poder calorífico, conforme Pessoa, 2020, média de 35.145 J g^{-1} .

Entretanto, a presença de elementos químicos, tais como o Cloro (Cl), Flúor (F), Cálcio (Ca) e o Sódio (Na) no CDR, pode causar deposição e, conseqüente corrosão no interior da caldeira. Outros elementos, como o Potássio (K) e o Sódio (Na), podem formar aglomerados, de modo que, se não houver ação corretora, poderá levar à sinterização de cinzas do CDR sobre a grelha (SAMPAIO, 2014).

Por outro lado, pode-se citar a utilização de algumas biomassas em processos de geração de eletricidade ou de vapor, como o bagaço da cana de açúcar, a palha da cana, o capim elefante, entre outros (AREIAS, 2020; GOLDEMBERG, 2017).

Segundo Pincelli, Moura e Brito (2017), utilizar a biomassa renovável, como a casca de eucalipto, por exemplo, para fins energéticos, é extremamente importante e viável, principalmente devido à sua abundância, facilidade quanto às estimativas de previsão e controle de sua produção e, ainda, seu baixo custo.

Outra biomassa também abundante no Brasil é a palha de cana-de-açúcar. Segundo a Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a área total colhida e produzida do setor sucroenergético brasileiro foi de 8,6 milhões de hectares, na safra 2020-2021, com incremento de 2,1% em relação à safra anterior (COSTA, A. O. da, et al., 2021; CONAB, 2021a; CONAB, 2021b). Cervi et al. (2019) afirmaram, ainda, o grande potencial energético existente sobre a palha de cana-de-açúcar.

Peters et al. (2020), embasados na hipótese de que a co-combustão entre biomassas e CDR em usinas existentes de alta eficiência seja uma solução para mitigar as mudanças climáticas, experimentaram três composições de biomassas e concluíram que o combustível ofereceu uma solução viável de baixo custo, para diminuir significativamente a emissão de CO_2 .

O objetivo foi investigar a formação de misturas, por meio do processo de aglutinação e de extrusão, entre frações de CDR e casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar.

5.2. Material e métodos

5.2.1. Material

Os materiais utilizados foram: o Combustível Derivado de Resíduo (CDR) (cerca de 30 kg), coproduto composto de resíduos sólidos industriais, triturados após processo de segregação manual; a casca de eucalipto triturada (cerca de 10 kg); e a palha de cana-de-açúcar triturada (cerca de 10 kg).

O CDR em formato original foi coletado na empresa do Grupo Salmeron especializada em gerenciamento de descartes, localizada no município de Sorocaba, São Paulo e as biomassas: casca de eucalipto, coletada na fábrica da Eucatex no município de Salto, estado de São Paulo, e a palha de cana-de-açúcar (cerca de 10 kg), coletada no viveiro de mudas da UFSCar Sorocaba, estado de São Paulo.

5.2.2. Preparação das amostras

Em laboratório da unidade SENAI “Celso Charuri”, no município de Guarulhos, estado de São Paulo, as amostras de CDR foram devidamente acondicionadas em bandejas e encaminhadas para estufa com renovação e circulação de ar (Luca-82/40, Lucadema, Brasil) (Figura 45) a 60 ± 1 °C, durante 24 horas, a fim de evitar a degradação do material e a geração de odores, bem como permitir a sua estocagem segura. Posteriormente, com base na norma técnica (ASTM E871-82, 2019), as amostras foram colocadas em bandejas de massa conhecida, pesadas e inseridas em estufa, novamente, a 103 ± 1 °C, com pesagens feitas até os materiais apresentarem massa constante.

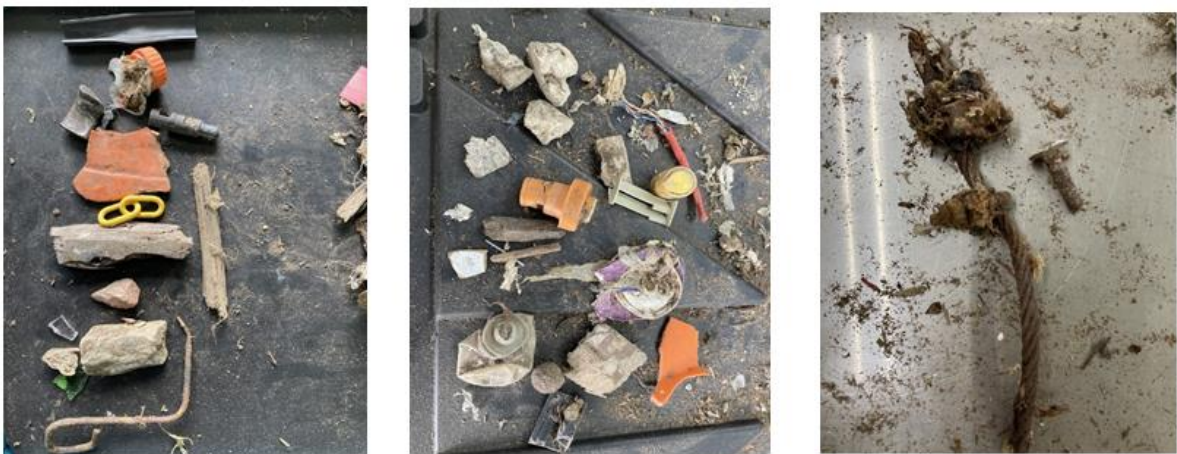
Figura 45 – Estufa com renovação e circulação de ar utilizado na pré-secagem dos materiais testados (Luca-82/40, Lucadema)



Fonte: Próprio autor (2022)

Após a secagem, as amostras de CDR passaram por segregação manual, para a retirada de objetos indesejados ao processo, como por exemplo, materiais que pudessem danificar o moinho: vidro, pedaços de cabo de aço, pedras, metais (parafusos, latas, etc.), pedaços de telhas, panos, entre outros materiais, com tipos ou dimensões incompatíveis ao processo de moagem utilizado (Figura 46).

Figura 46 – Objetos segregados anterior ao processo de moagem (vidro, pedaços de cabo de aço, pedras, parafusos, latas, etc.)



Fonte: Próprio autor (2022)

Após segregação, o CDR foi encaminhado para a trituração, no moinho, com peneira acoplada de 5/16” (7,94 mm) de abertura (P1004, Primotécnica, Brasil) (Figura 47).

Figura 47 – Triturador utilizado na moagem dos materiais testados (P1004, Primotécnica)



Fonte: Próprio autor (2022)

As amostras de biomassas (casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar) tratadas, para alcançarem 12% de umidade, também foram trituradas no mesmo moinho (Figura 47). Para cada material e etapa, foram realizadas limpezas das facas e dos seus compartimentos.

Após a trituração, com o objetivo de produzir grãos, grânulos ou *flakes* (este último um tipo de grânulo, mas com formato indefinido), primeiramente, com 100% de CDR, foram testadas duas hipóteses: a avaliação da possibilidade do uso dos processos de aglutinação e de extrusão.

5.2.3. Processo de aglutinação

Conforme o relatório técnico de Santos e Otterbach (2014), os filmes ou laminados de PVC e outros tipos de filmes plásticos podem ser aglutinados da mesma maneira. O equipamento utilizado para aglutinar filmes plásticos é denominado aglutinador, adensador, aglomerador, ou ainda, misturador.

O teste para a formação de *flakes* de CDR por meio do processo de aglutinação, foi realizado para o tratamento T1, 100% de CDR (triturado e seco). O equipamento utilizado foi o aglutinador (AXMIX, AX Plásticos, Brasil) com capacidade de 18 litros (Figura 48).

Figura 48 - Misturador utilizado nos testes para aglutinação do CDR (Mix.15.AX, AX Plásticos)



Fonte: Próprio autor (2022)

Entre os diversos tipos de materiais poliméricos que compõem o CDR *in natura*, um dos mais presentes encontrados nas amostras, foi o polipropileno bi-orientado, em inglês *biaxially oriented polypropylene* (BOPP). Amplamente utilizado em embalagens plásticas para conservação de alimentos, trata-se de um derivado do polipropileno (PP). Conforme Rossini (2005), a temperatura de fusão do polipropileno (PP) é na faixa de 160 a 175 °C.

Foram utilizados 3 kg de material triturado e seco (Tratamento T1 – 100% de CDR, triturado e seco). O misturador foi ajustado para 1.800 RPM e temperatura de 150 °C, mas com a descarga do misturador controlada manualmente, com o objetivo de observar o comportamento do material, a fim de evitar a degradação e a inflamabilidade dos demais elementos presentes em sua composição.

O material foi processado no aglutinador, até que a temperatura se aproximasse de 150 °C. Para isso, foi necessária uma hora e cinquenta e quatro minutos, momento no qual foi injetado 300 ml de água para a ocorrência de choque térmico e, em seguida, a realização da descarga ao compartimento resfriador.

Outro tratamento, denominado T1.1, 100% de CDR (*in natura*, segregado e seco), também foi inserido e testado em um outro aglutinador (AS500, Seibt, Brasil) com capacidade de produção de 150 kg h⁻¹ (Figura 49).

Figura 49 - Aglutinador (AS500, Seibt), utilizado nos testes com CDR



Fonte: Próprio autor (2022)

No tratamento T1.1, com 100 % de CDR *in natura* segregado e seco (Figura 50) foi utilizado aproximadamente 3 kg de material. O aglutinador (Figura 51 A) foi acionado em plena potência (30 CV) e a temperatura, monitorada por termômetro infravermelho a laser (62 MAX+, Fluke, Estados Unidos da América) (Figura 51 B).

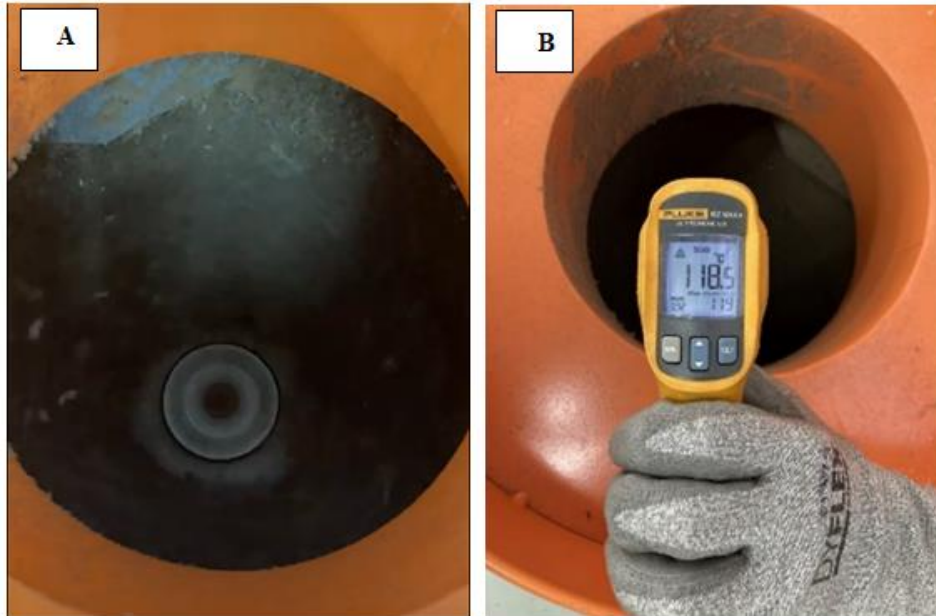
Figura 50 - Tratamento T1.1 com 100 % de CDR *in natura* segregado e seco



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 51 - Teste no aglutinador (A) do tratamento T1.1, 100 % de CDR *in natura*, segregado e seco e monitoramento da temperatura por termômetro digital (B)

Fonte:



Próprio autor (2022)

Outros tratamentos foram realizados, com base nos estudos de Bartos et al., (2021) e de conceitos sobre a utilização de aditivos, apresentados por Rossini (2005):

- T1.2, com 3,70 kg de CDR com a adição de 1,60 kg de filme plástico PEBD (Polietileno de Baixa Densidade);
- T1.3 com 1,5 kg de CDR com 30 g de estearina (aditivo utilizado em indústrias químicas e de plásticos para conferir efeito ligante a outros materiais).

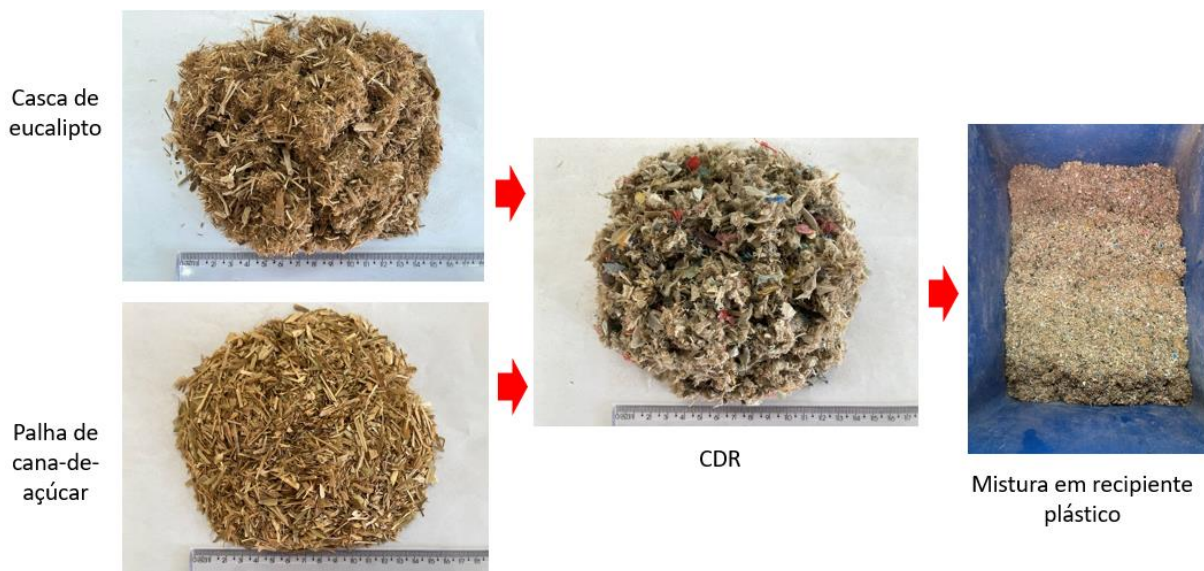
5.2.4. Processo de extrusão

Outra técnica de reaproveitamento e reutilização de polímeros, em que são transformados os materiais plásticos, com formato granulado, em materiais com formatos contínuos, como barras, tarugos ou outros formatos desejados, é o processo de compactação por extrusão (KERDSUWAN; MEENAROCH; CHALERMCHAROENRAT, 2016).

Com base nisso, no laboratório da unidade SENAI “Mário Amato”, no município de São Bernardo do Campo, estado de São Paulo, as amostras dos materiais em estudo (CDR e biomassas) triturados e secos (12% de umidade), foram preparadas, pesadas e misturadas

manualmente em caixa plástica de 180 litros (Figura 52), conforme sete tratamentos estabelecidos para os testes.

Figura 52 – Preparação das amostras de CDR e das misturas com as biomassas em caixa plástica de 180 litros



Fonte: Próprio autor (2022)

Cada mistura foi levada e inserida em uma máquina extrusora monorosca (D.60X25D, Miotto, Brasil), com capacidade de produção de 50 kg h^{-1} (Figura 53). A extrusora, com cinco zonas de aquecimento, tiveram seus controles ajustados em $250 \text{ }^\circ\text{C}$, exceto a zona 1, na entrada do material (funil), teve seu ajuste em $160 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 53 - Máquina de extrusão tipo monorosca parafuso com aquecedor na matriz (D.60X25D, Miotto) com capacidade de produção de 50 kg h^{-1} , utilizado no processo de compactação dos materiais testados



Fonte: Próprio autor (2022)

Para a realização dos testes na extrusora, inicialmente de forma a auxiliar na limpeza das suas partes internas, foram utilizados 5,00 kg de CDR triturado (Tratamento T1). Na sequência, para a preparação da formação das misturas dos demais tratamentos (T2 a T7) foram utilizados 3,00 kg como referência para cada tratamento.

Na produção das misturas de CDR com as biomassas casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar, foram aplicados os tratamentos:

- T1 – 100% CDR (5,00 kg);
- T2 – 90% CDR (2,70 kg) com 10% de casca de eucalipto (0,30 kg);
- T3 – 75% CDR (2,25 kg) com 25% de casca de eucalipto (0,75 kg);
- T4 – 50% CDR (1,50 kg) com 50% de casca de eucalipto (1,50 kg);
- T5 – 90% CDR (2,70 kg) com 10% de palha de cana-de-açúcar (0,30 kg);
- T6 – 75% CDR (2,25 kg) com 25% de palha de cana-de-açúcar (0,75 kg);
- T7 – 50% CDR (1,50 kg) com 50% de palha de cana-de-açúcar (1,50 kg).

5.2.5. Granulometria

A determinação da granulometria foi realizada por meio de peneiramento mecânico manual, com base na norma ASTM D293M-18 (ASTM, 2010). Para cada tratamento, a classificação da granulometria foi feita em duplicata, num total de 13 amostras (sete para as misturas em *flakes*, seis para as misturas em pedaços). Nos ensaios, foram usadas duas peneiras (BERTEL, Brasil), com abertura de malha progressiva, para os *flakes*, com a abertura maior de 35 *mesh* (0,500 mm), e a menor, 60 *mesh* (0,250 mm) e para os formatos em pedaços, 35 *mesh* (0,500 mm) e 100 *mesh* (0,149 mm).

5.2.6. Densidade a granel

A determinação da densidade a granel (base seca, Equação 11) foi realizada por meio de um recipiente de volume e formato conhecidos, ou seja, em um béquer de 1 L de capacidade, cujas amostras foram inseridas até preencher seu volume. Na sequência, suas massas foram registradas em balança semi-analítica, de duas casas decimais (BL3200H, Shimadzu, Brasil). A determinação foi realizada em duplicata.

$$D_{gr} = \frac{m_{ra} - m_r}{v_r} \quad (11)$$

Onde:

$$D_{gr} = \text{Densidade a granel (g cm}^{-3}\text{)}$$

$$m_{ra} = \text{massa do recipiente com amostra (g)}$$

$$m_r = \text{massa do recipiente (g)}$$

$$v_r = \text{volume do recipiente (cm}^3\text{)}$$

A densidade a granel dos tratamentos desta etapa do trabalho foi determinada após a extrusão, tanto para os *flakes* como para os pedaços.

5.2.7. Umidade

Para a determinação da umidade dos tratamentos após o processo de extrusão foi utilizado a balança determinadora de umidade (ID 200, Marconi, Brasil) (Figura 54).

Figura 54 – Balança determinadora de umidade (ID 200, Marconi) utilizada na determinação da umidade das biomassas e misturas de CDR e biomassas em formatos de *flakes*



Fonte: Próprio autor (2022)

5.2.8. Análise Imediata

5.2.8.1. Teor de voláteis

O teor de voláteis (materiais que evaporam facilmente) (Equação 12) foi determinado com base na norma ASTM E872-82 (ASTM, 2019). Foram colocados, aproximadamente, 2,0 g do material seco em cadinhos de porcelana, calcinados e com tampa, de massa conhecida. Em seguida, foram pesados em balança analítica de quatro casas decimais (AUY220, Shimadzu, Japão) e levados para o forno tipo mufla (LF00212, JUNG, Brasil) a 950 °C, onde ficaram, primeiro, por três minutos sobre a porta aberta, e nos sete minutos seguintes, dentro, de porta fechada. Posteriormente, os cadinhos foram resfriados em dessecador com sílica e pesados. A determinação foi realizada em triplicata.

$$TV (\%) = \frac{(m_{is} - m_{fs})}{m_{as}} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

TV = Teor de voláteis (%);

m_{is} = massa do cadinho mais amostra inicial seca (g);

m_{fs} = massa do cadinho mais amostra final seca (g);

m_{as} = massa da amostra seca (g)

5.2.8.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas (resíduos da combustão) (Equação 13) foi determinado, em triplicata, a partir da norma (ASTM D1102-84, 2021). Os cadinhos de porcelana, previamente calcinados, foram pesados, adicionados 2,0 g de CDR seco e levados ao forno-mufla, à 600 °C, por seis horas. Depois, foram resfriados em dessecador com sílica e pesados em temperatura ambiente.

$$TC_z (\%) = \frac{(m_{cr} - m_c)}{m_{as}} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

TC_z = Teor de cinzas (%);

m_{cr} = massa do cadinho mais o resíduo após a combustão (g);

m_c = massa do cadinho (g);

m_{as} = massa da amostra seca (g).

5.2.8.3. Teor de carbono fixo

O carbono fixo (Equação 14) foi determinado subtraindo-se de 100 % da soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas.

$$TCO_f (\%) = 100 - (TC_z + TV) \quad (14)$$

Onde:

TCO_f = Teor de carbono fixo (%);

TC_z = Teor de cinzas (%);

TV = Teor de voláteis (%).

5.2.9. Poder calorífico superior (PCS)

O PCS foi determinado a partir de 0,5 g de amostra seca, com base na norma ASTM D5865-13 (2014). Para a realização das análises, foi utilizado um calorímetro (C200, IKA).

5.2.10. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas respeitando os pressupostos de homogeneidade de variância e de normalidade dos resíduos, verificados pelo teste de Bartlett e de Shapiro-Wilk, respectivamente. Os dados obtidos para as misturas de CDR com as biomassas de densidade a granel, umidade, análise imediata e poder calorífico superior, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao Teste de *Tukey* (com 5% de significância). Todos os testes foram calculados com o *software* R versão 3.1.3 (R Core Team, 20150).

5.3. Resultados e Discussão

Os resultados mostraram que a utilização do aglutinador não foi satisfatória. Ou seja, em todos os tratamentos ensaiados não houve a formação de material aglutinado/compactado.

Ainda que não exista literatura específica quanto ao uso do aglutinador na geração de *flakes* de CDR (grânulos de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos), foram testadas diversas possibilidades. As observações permitiram supor que isso ocorreu devido à heterogeneidade do CDR, pois essa característica impediu que os polímeros presentes no material produzissem o mesmo efeito causado com polímeros sem misturas, quando submetidos ao choque térmico e em tempo certo (SANTOS; OTTERBACH, 2014). Uma das hipóteses foi de que os fragmentos provenientes do atrito do papel, papelão, biomassas, pedaços de pano, entre outros materiais incompatíveis e presentes em sua composição, mesmo triturados antes e recortados novamente, durante a aglutinação, causaram poeira intensa e excessiva, o que dificultou a contração dos materiais poliméricos da mistura para a produção dos *flakes*.

Mesmo adicionados ao CDR triturado, frações extras de filme plástico PEBD (polietileno de baixa densidade) ou mesmo estearina, um aditivo muito utilizado em indústrias químicas e de plásticos, a qual confere efeito ligante e consistência a outros materiais, não produziram a reação esperada. A Figura 55 apresenta a não formação de *flakes* entre as partículas de polímeros e os diversos resíduos presentes.

Figura 55 – Resultados do processo de aglutinação com a não formação de *flakes* realizados no aglutinador (AS500, Seibt), utilizado nos testes com CDR



Fonte: Próprio autor (2022)

Após os ensaios de utilização do processo de aglutinação para a formação de *flakes* de CDR sem sucesso, se fez necessário pesquisar e investigar alternativas para compactação e densificação dos materiais, dos quais optou-se pelo processo de extrusão para a realização de novos testes.

5.3.1. Granulometria

Os referidos tratamentos foram produzidos em sua maioria, em dois formatos: *flakes* e pedaços, originados das borras geradas pela extrusora (Tabela 18 e Figuras 64 e 65), exceto T1, produzido somente em formato de *flakes*.

Tabela 18 – Definição dos formatos da produção das misturas 100% CDR e entre CDR e biomassas por meio do processo de extrusão

Tratamentos	<i>Flakes</i> (moinho de baixa velocidade)	Pedaços
T1 – 100% CDR	X	-
T2 – 90% CDR com 10% de casca de eucalipto	X	X
T3 – 75% CDR com 25% de casca de eucalipto	X	X
T4 – 50% CDR com 50% de casca de eucalipto	X	X
T5 – 90% CDR com 10% de palha de cana-de-açúcar	X	X
T6 – 75% CDR com 25% de palha de cana-de-açúcar	X	X
T7 – 50% CDR com 50% de palha de cana-de-açúcar	X	X

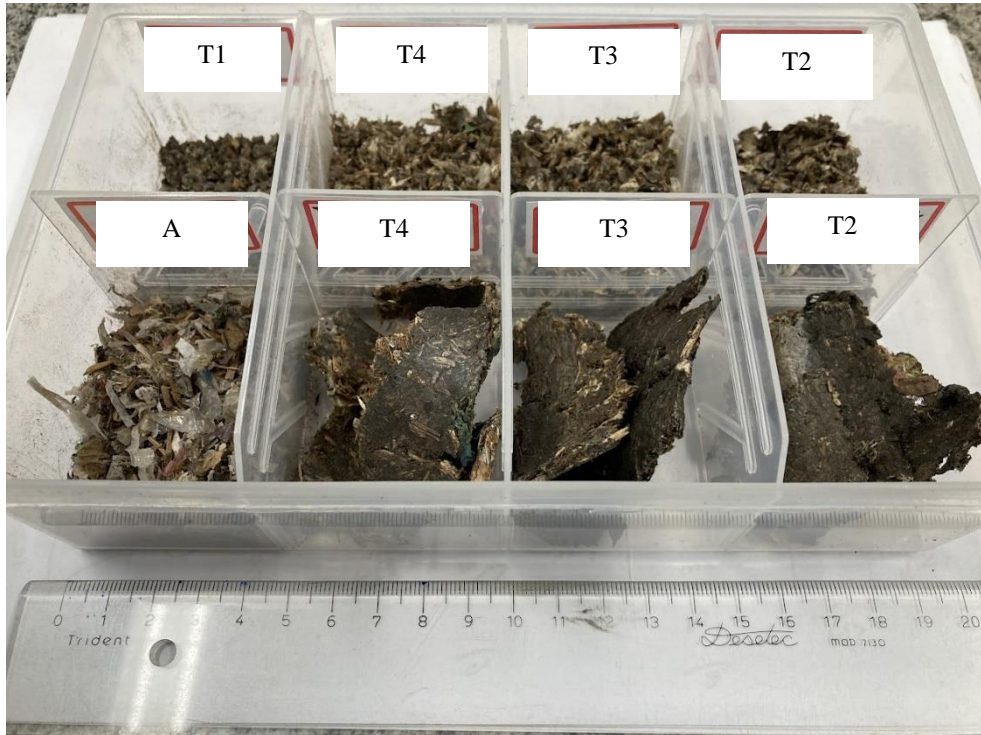
Fonte: Próprio autor (2022)

Os resultados alcançados por meio do processo de extrusão foram, portanto, treze tratamentos, sendo produzidos ao todo: sete em formato de *flakes* (grânulos de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos) e seis em formato de pedaços (material compactado de misturas de CDR com biomassas e formatos indefinidos). Vale observar na Tabela 18 que T1 (100% CDR) foi produzido somente no formato de *flakes*, não fazendo falta seu formato em pedaços, pois o propósito do trabalho foi testar e investigar principalmente a mistura entre biomassas e CDR.

Para visualização geral dos tratamentos produzidos e do CDR (triturado e seco), foram distribuídos em duas caixas organizadoras, sendo uma para as misturas CDR com casca de eucalipto (Figura 56) e outra para as misturas CDR com palha de cana-de-açúcar (Figura 57), identificados e pesados da seguinte forma.

- T1 – *Flakes* 100% CDR (~ 5g);
- T4 – *Flakes* 50% CDR com 50% de casca de eucalipto (~ 5g);
- T3 – *Flakes* 75% CDR com 25% de casca de eucalipto (~ 5g);
- T2 – *Flakes* 90% CDR com 10% de casca de eucalipto (~ 5g);
- A – CDR seco e triturado (~ 5g);
- T4 – Pedaços 50% CDR com 50% de casca de eucalipto (~ 8g);
- T3 – Pedaços 75% CDR com 25% de casca de eucalipto (~ 8g);
- T2 – Pedaços 90% CDR com 10% de casca de eucalipto (~ 8g).

Figura 56 – Tratamentos em formatos de *flakes* e em pedaços de CDR 100 % e de misturas de CDR com casca de eucalipto, produzidos por meio do processo de extrusão



Fonte: Próprio autor (2022)

Sendo assim, além de serem visualizados os tratamentos produzidos com as misturas CDR e casca (*flakes* e pedaços), vale destacar que o material em “A” pode servir para observação e comparação do volume e da transformação do material *in natura* triturado nos tratamentos propostos.

A outra caixa organizadora para as misturas CDR com palha de cana-de-açúcar (Figura 65), foram identificados e pesados da seguinte forma.

- T1 – *Flakes* 100% CDR (~ 5g);
- T7 – *Flakes* 50% CDR com 50% de palha de cana-de-açúcar (~ 5g);
- T6 – *Flakes* 75% CDR com 25% de palha de cana-de-açúcar (~ 5g);
- T5 – *Flakes* 90% CDR com 10% de palha de cana-de-açúcar (~ 5g);
- A – CDR seco e triturado (~ 5g);
- T7 – Pedaços 50% CDR com 50% de palha de cana-de-açúcar (~ 8g);
- T6 – Pedaços 75% CDR com 25% de palha de cana-de-açúcar (~ 8g);
- T5 – Pedaços 90% CDR com 10% de palha de cana-de-açúcar (~ 8g).

Figura 57 - Tratamentos em formatos de *flakes* e em pedaços de CDR 100 % e de misturas de CDR com palha de cana-de-açúcar, produzidos por meio do processo de extrusão



Fonte: Próprio autor (2022)

Desta forma, além de serem visualizados os tratamentos produzidos com as misturas CDR e palha (*flakes* e pedaços), vale destacar que a amostra em A1 pode servir para observação e comparação do volume e da transformação do material *in natura* nos tratamentos propostos.

Outra observação que vale reforçar é notar o volume menor entre as amostras de CDR *in natura* dispostas em “A” nas duas caixas, sendo que em ambas são aproximadamente 5 g. Isso pode auxiliar a verificação da heterogeneidade do material, pois foram inseridos intencionalmente materiais coletados em dias diferentes.

Os *flakes* foram produzidos por meio de moinho de baixa velocidade (MP 20, Meysi, Brasil) com capacidade de produção aproximada de 20 kg h⁻¹ (Figura 58).

Figura 58 – Moinho de baixa velocidade (MP 20, Meysi, Brasil) utilizado na produção das misturas em formato de *flakes* 100% CDR e entre CDR e biomassas por meio de processo de extrusão



Fonte: Próprio autor (2022)

A trituração no moinho de baixa velocidade dos coprodutos produzidos após o processo de extrusão do CDR e das misturas de CDR com as biomassas obteve-se a formação dos *flakes*. Foi realizada a classificação granulométrica dos tratamentos T1 - 100% CDR e T2, T3 e T4 das misturas de CDR com casca de eucalipto, todos em formato de *flakes*.

A Tabela 19 apresenta os resultados da média aritmética do ensaio em duplicata e seus desvios-padrão.

Tabela 19 - Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de *flakes* de 100 % CDR e misturas de CDR com casca de eucalipto

Peneiras		% média retida por peneira			
<i>Tyler</i> (<i>Mesh</i>)	Abertura (mm)	T1 - 100 % CDR	T2 - 90 % CDR 10 % Casca	T3 - 75 % CDR 25 % Casca	T4 - 50 % CDR 50% Casca
35	0,500	97,05 ± 0,16	96,78 ± 0,24	97,69 ± 0,13	95,18 ± 0,19
60	0,250	1,36 ± 0,18	1,42 ± 0,56	1,01 ± 0,12	2,36 ± 0,23
Fundo	< 0,15	1,58 ± 0,27	1,80 ± 0,36	1,30 ± 0,31	2,46 ± 0,29
Total	-	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2022)

Pode-se observar que mais de 90% dos resultados estão dentro da faixa de 0,50 mm (ou 35 *mesh*), devido à formação dos *flakes*. Essa concentração se deve à formação de uma camada de partículas, por conta de suas próprias características físicas.

Os valores encontrados da classificação granulométrica dos tratamentos T1, em *flakes* de 100% CDR, e T5, T6 e T7, de misturas de CDR com palha de cana-de-açúcar, resultaram da média aritmética do ensaio em duplicata e seus desvios-padrão (Tabela 20).

Tabela 20 - Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de *flakes* de 100 % CDR e misturas de CDR com palha de cana-de-açúcar

Peneiras		% média retida por peneira			
<i>Tyler (Mesh)</i>	Abertura (mm)	T1 - 100 % CDR	T5 - 90 % CDR 10 % Palha	T6 -75 % CDR 25 % Palha	T7 - 50 % CDR 50% Palha
35	0,500	97,05 ± 0,16	98,33 ± 0,14	97,26 ± 0,15	96,04 ± 0,11
60	0,250	1,36 ± 0,18	1,01 ± 0,46	1,44 ± 0,11	2,28 ± 0,21
Fundo	< 0,15	1,58 ± 0,27	0,67 ± 0,26	1,30 ± 0,25	1,69 ± 0,19
Total	-	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2022)

Pode-se observar que, também, mais de 90% das partículas estão dentro de 0,50 mm (ou 35 *mesh*), devido à formação dos *flakes*. Assim como na experimentação anterior, essa concentração se deve à formação de uma camada de partículas, devido às suas próprias características.

Nesta etapa, somente para a proporção de 50% dos tratamentos em pedaços das misturas de CDR com casca de eucalipto e de CDR com palha de cana-de-açúcar, T4 e T7, respectivamente, resultaram da média aritmética do ensaio em duplicata e seus desvios-padrão (Tabela 21). As demais proporções dos tratamentos T2, T3, T5 e T6 (90% e 10% e 75% e 25 %) para as duas misturas, concentraram-se totalmente na faixa de 0,50 mm (ou 35 *mesh*), confirmando o previsível, pois o processo de extrusão produziu um coproduto em pedaços com formatos indefinidos, concentrando o material na peneira com a abertura maior.

Tabela 21 - Classificação granulométrica média (%) das amostras em formato de pedaços de misturas de CDR com casca e CDR com palha de cana-de-açúcar

Peneiras		% média retida por peneira	
<i>Tyler (Mesh)</i>	Abertura (mm)	T4 - 50 % CDR 50% Casca	T7 - 50 % CDR 50% Palha
35	0,500	99,60 ± 0,18	99,01 ± 0,19
100	0,149	0,15 ± 0,08	0,31 ± 0,11
Fundo	< 0,15	0,24 ± 0,09	0,68 ± 0,09
Total	-	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2022)

O resultado da granulometria, para os tratamentos T4 e T7 (CDR com casca e palha respectivamente), também era esperado, pois a concentração em mais de 95% do material, a 0,50 mm (ou 35 *mesh*), foi devido ao seu formato em pedaços, em que somente algumas partículas passaram para outra peneira. Além disso, pôde-se notar que a proporção de 50% foi o tratamento menos compacto, com maior friabilidade (esfarelamento) quando manuseado. Vale registrar que se notou maior friabilidade ao manusear o material de CDR com palha, se comparado ao material de CDR com casca, em geral.

5.3.2. Densidade a granel

A Tabela 22 apresenta a densidade a granel dos tratamentos em formato de *flakes*.

Tabela 22 - Valores médios para a densidade a granel dos tratamentos em formato de *flakes*

Tratamento	Densidade (kg m ⁻³)
T1 - 100 % CDR	346,10 ± 8,24 ^a
T2 – 90 % CDR com 10 % de casca	243,17 ± 6,98 ^{bc}
T3 – 75 % CDR com 25 % de casca	233,60 ± 2,81 ^c
T4 – 50 % CDR com 50 % de casca	189,50 ± 4,45 ^d
T5 – 90 % CDR com 10 % de palha	257,17 ± 4,41 ^b
T6 – 75 % CDR com 25 % de palha	197,39 ± 4,21 ^d
T7 – 50 % CDR com 50 % de palha	163,78 ± 7,71 ^e

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

Os valores resultam da média aritmética das duplicatas e seus desvios-padrão de cada um dos tratamentos em formato de *flakes* estabelecidos nos testes (Tabela 22). A densidade média geral ficou em 232,96 (kg m⁻³); a média dos *flakes* CDR com casca, 222,09 (kg m⁻³); e a média dos *flakes* CDR com palha, 206,11 (kg m⁻³). Os resultados mostraram, em sua maioria, *flakes* com densidade relativamente superiores, quando comparadas a outros produtos de origem vegetal, tais como os encontrados por Chrisostomo (2011): serragem de eucalipto (228,31 kg m⁻³) e bagaço da cana (143,75 kg m⁻³), ambos nas condições que foram coletados.

O tratamento T1 (100% - CDR) apresentou o melhor resultado, dada a sua maior densidade, embora aqui, esta não seja a proposta de utilização. Seu resultado, estatisticamente diferente dos demais tratamentos, confirma a característica adotada para o teste, ou seja, sem misturas com biomassas. Na ordem, o segundo melhor resultado foi o tratamento T5 (90% CDR com 10% de palha), seguido pelo tratamento T2 (90% CDR com 10% de casca), que não apresentaram diferença estatística significativa entre si a 5%. O quarto melhor resultado foi T3 (75% CDR com 25% de casca) que, estatisticamente, não difere do terceiro (T2). O quinto, T6 (75% CDR com 25% de palha), seguido pelo T4 (50% CDR com 50% de casca) não diferiram estatisticamente entre si e por fim, o pior resultado T7 (50% CDR com 50% de palha), estatisticamente diferiu do imediatamente anterior, T4 (50% CDR com 50% de casca), mas com relativa aproximação. Os resultados obtidos apontaram para a hipótese de que a melhoria da densidade se deu nos tratamentos com maior porcentagem de CDR nas misturas.

De forma análoga às análises realizadas com os *flakes*, a Tabela 23 apresenta os valores da média aritmética das duplicatas e seus desvios-padrão de cada um dos tratamentos produzidos, em formato de pedaços estabelecidos nos testes.

Tabela 23 - Valores médios para a densidade a granel dos tratamentos em formato de pedaços

Tratamento	Densidade (kg m⁻³)
T2 – 90 % CDR com 10 % de casca	213,27 ± 2,62 ^a
T3 – 75 % CDR com 25 % de casca	196,66 ± 7,25 ^a
T4 – 50 % CDR com 50 % de casca	204,73 ± 6,48 ^a
T5 – 90 % CDR com 10 % de palha	161,09 ± 2,46 ^b
T6 – 75 % CDR com 25 % de palha	166,28 ± 0,80 ^b
T7 – 50 % CDR com 50 % de palha	161,45 ± 7,79 ^b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

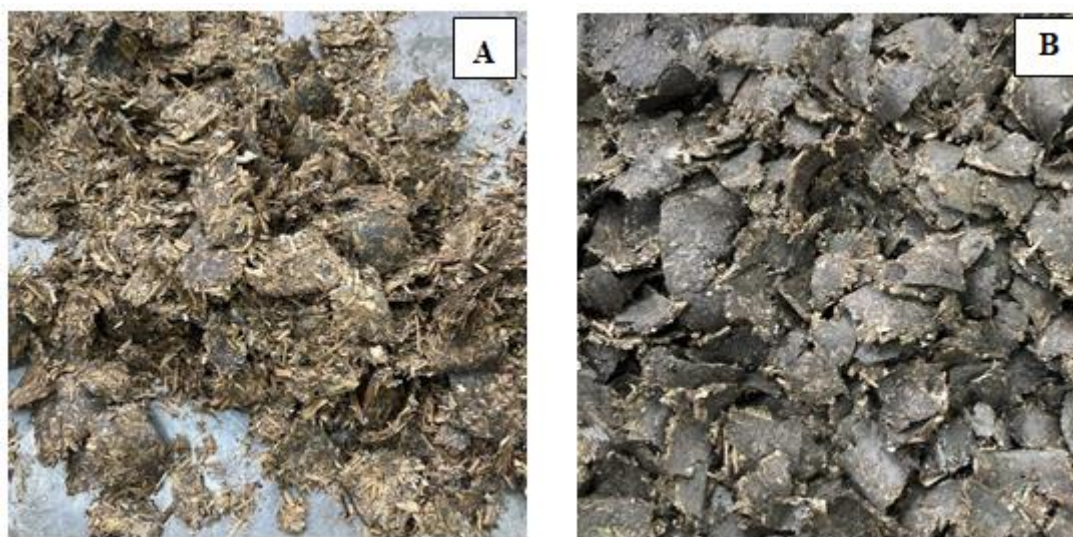
Fonte: Próprio autor (2022)

A densidade a granel média geral foi 183,91 (kg m⁻³); a média dos pedaços do CDR com casca, 204,88 (kg m⁻³); e a média dos pedaços de CDR com palha, 162,94 (kg m⁻³). Os resultados mostraram dois tratamentos em forma de pedaços (T5 e T7) com densidades menores que a menor densidade encontrada nos *flakes*, porém relativamente próximos.

O melhor resultado entre os pedaços foi o tratamento T2 (90% CDR com 10% de casca), seguidos por T4 (50% CDR com 50% de casca) e T3 (75 % CDR com 25 % de casca). T6 (75% CDR com 25% de palha), T7 (50 % CDR com 50 %) e T5 (90 % CDR com 10 % de palha), respectivamente resultaram na ordem decrescente. A análise estatística mostrou que os três maiores tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, que diferiram dos três menores, que também não diferiram estatisticamente entre si.

Contudo, ao comparar as variações entre o conjunto das maiores densidades dos tratamentos com o conjunto das menores densidades, pode-se supor que a diferença significativa observada neste caso, esteja relacionada à compactação do CDR com as biomassas aplicadas, dadas às suas características e propriedades distintas. Vale reforçar que se notou maior friabilidade quando manuseado o tratamento CDR com a palha (Figura 59 A), se comparado ao tratamento CDR com casca (Figura 59 B).

Figura 59 – Resultados do processo de extrusão de pedaços das misturas entre CDR com palha de cana-de-açúcar (A) e CDR com casca de eucalipto (B) realizados na extrusora monorosca (D.60X25D, Miotto)



Fonte: Próprio autor (2022)

Desta forma, todos os tratamentos de CDR com palha no formato em pedaços, apresentaram resultados inferiores de densidade, comparado aos tratamentos de CDR com casca.

Outra característica também observada que pode explicar a densidade média menor encontrada para o formato em pedaços comparada aos *flakes*, são os espaços vazios no béquer causados pelos formatos indefinidos produzidos (Figura 59 B).

As médias e os desvios-padrão de densidade do CDR *in natura*, e do CDR, da casca de eucalipto e da palha de cana-de-açúcar, triturados e secos (~ 12 % de umidade), encontrados neste trabalho, durante a caracterização do material, realizada anteriormente ao processo de extrusão são apresentadas na Tabela 24.

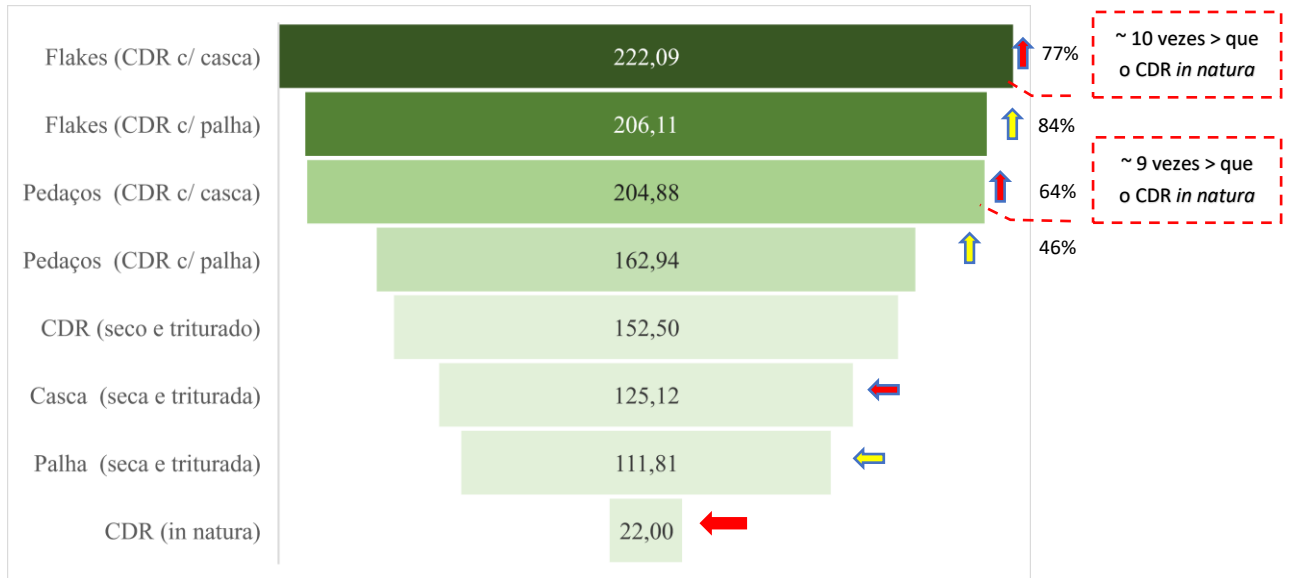
Tabela 24 - Valores médios para a densidade a granel das amostras de CDR *in natura*, CDR triturado e seco e das biomassas casca de eucalipto e palha de cana trituradas e secas e seus respectivos desvios-padrão

Material	Densidade (kg m ⁻³)
CDR <i>in natura</i>	22 ± 11,37
CDR triturado	152,50 ± 32,89
Casca de eucalipto triturada	125,12 ± 0,73
Palha de cana triturada	111,81 ± 0,25

Fonte: Próprio autor (2022)

Para um comparativo, exclusivamente entre médias, pode-se observar que todas as densidades encontradas nos tratamentos estudados neste trabalho, obtiveram valores superiores às densidades: do CDR *in natura*, do CDR triturado, da casca de eucalipto e da palha de cana isoladamente (Figura 60).

Figura 60 – Comparativo entre médias das densidades a granel dos tratamentos (kg m^{-3})



Fonte: Próprio autor (2022)

Pode-se observar na Figura 60 que a maior densidade encontrada para o tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com casca) de $222,09 \text{ kg m}^{-3}$, comparada à casca (seca e triturada) com $125,12 \text{ kg m}^{-3}$, alcançou um resultado aproximadamente 77% superior.

Ao comparar-se o tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) de $206,11 \text{ kg m}^{-3}$, com a palha de cana (seca e triturada) $111,81 \text{ kg m}^{-3}$, nota-se um resultado aproximadamente 84% superior.

Se comparado o tratamento produzido em formato de pedaços (CDR com casca) de $204,88 \text{ kg m}^{-3}$, com a casca (seca e triturada) $125,12 \text{ kg m}^{-3}$, observa-se um resultado aproximadamente 64% superior. Quando comparado o tratamento produzido em formato de pedaços (CDR com palha) de $162,94 \text{ kg m}^{-3}$, com a palha de cana (seca e triturada) $111,81 \text{ kg m}^{-3}$, observa-se um resultado aproximadamente 46% superior.

Ao comparar-se novamente o tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) de $206,11 \text{ kg m}^{-3}$, com o CDR (*in natura*) $22,00 \text{ kg m}^{-3}$, nota-se um resultado aproximadamente 909,5% superior, ou seja, aproximadamente 10 vezes maior, e por fim, ao se considerar a comparação do tratamento (CDR com casca) de $204,88 \text{ kg m}^{-3}$ com o CDR (*in natura*) $22,00 \text{ kg m}^{-3}$, o resultado é um aumento de 831,2 %, ou seja, uma densidade

aproximadamente 9 vezes maior. Vale destacar que este último tratamento citado na comparação (CDR com casca) em formato de pedaços, foi o que apresentou maior compactação.

Desta forma, com base nos resultados encontrados de densidade, um dos parâmetros utilizados para avaliar a qualidade de um combustível, pode-se inferir que há a possibilidade da otimização das biomassas com o uso de CDR utilizando o processo da extrusão.

Comparativamente, para o CDR, Peters et al. (2020) encontraram densidade de 190 kg m^{-3} . Hryb e Matyasik (2018), 160 kg m^{-3} e Infesta et al. (2019), 250 kg m^{-3} . Assim, a densidade a granel média dos tratamentos encontrada neste trabalho, de $232,96 \text{ kg m}^{-3}$ para o formato *flakes* e $183,91 \text{ kg m}^{-3}$ para o formato em pedaços, comparada com a média de $200,00 \text{ kg m}^{-3}$, encontrada na literatura, demonstram relativa convergência. Tais resultados ocorreram, provavelmente, devido ao processo de trituração do CDR, comum entre eles.

Caputo e Pelagagge (2002), citam que, a fim de facilitar o armazenamento e o transporte, o CDR triturado pode ser compactado, a partir do uso de uma briquetadeira ou de uma peletizadora. Os autores consideram que esta operação não altera a eficiência da linha de produção do CDR, mas modifica sua densidade. Afirmam, ainda, que os peletizadores produzem um CDR de alta densidade (cerca de 700 kg m^{-3}), mas que isso pode ser inadequado para alguns tipos de caldeiras, como o leito fluidizado, por exemplo. Declararam, também, que processos densificadores simples produzem um combustível de menor densidade (300 a 400 kg m^{-3}), faixa superior à encontrada nos tratamentos deste trabalho.

Ao considerarmos a densidade como uma das propriedades relevantes, relacionadas ao armazenamento, transporte e, principalmente, manuseio, os tratamentos produzidos: *flakes* e pedaços, apontaram, portanto, para densidades e formatos favoráveis que podem servir como alternativa de combustível para caldeiras ou altos-fornos.

5.3.3. Umidade

Para medir a umidade do coproduto produzido foi adotado a utilização da balança determinadora de umidade (ID 200, Marconi, Brasil). Portanto, foi levantada exclusivamente, a média das medições em duplicata da umidade e seus desvios-padrão dos tratamentos em formato de *flakes* do CDR com as respectivas biomassas (Tabela 25).

Tabela 25 - Umidade obtida a partir das médias aritméticas das duplicatas e seus respectivos desvios-padrões dos tratamentos em formato de *flakes*

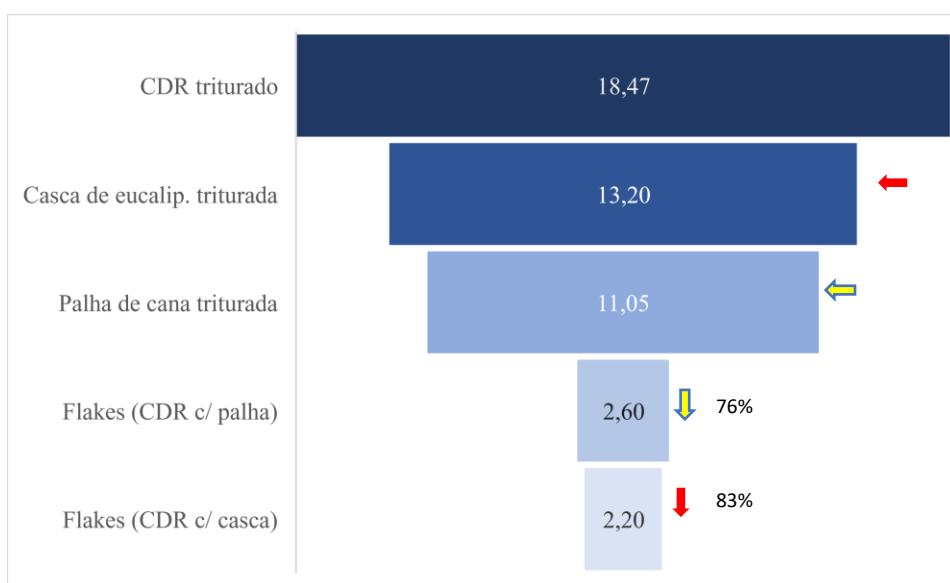
Material	Umidade (%)
CDR com casca (<i>flakes</i>)	2,20 ± 0,61
CDR com palha (<i>flakes</i>)	2,60 ± 0,40

Fonte: Próprio autor (2022)

Os teores médios de umidade do CDR e das biomassas (triturados e secos) encontrados neste trabalho durante a caracterização dos materiais foram: CDR (18,47%); casca de eucalipto (13,20%); e palha de cana (11,05%). Portanto, ao comparar-se com os obtidos (Tabela 25), pode-se observar, que a extrusão, com aquecimento ajustado a 250 °C, contribuiu para a redução da umidade dos tratamentos propostos, aspecto relevante com relação à qualidade do combustível.

A Figura 61 apresenta um comparativo entre as médias dos valores de umidade encontradas do CDR triturado, das biomassas trituradas: casca de eucalipto e palha de cana-de-açúcar e dos *flakes*: (CDR com palha) e (CDR com casca).

Figura 61 – Comparativo entre médias das umidades dos tratamentos (%)



Fonte: Próprio autor (2022)

Pode-se observar na Figura 61 que a umidade encontrada para o tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) de 2,60 % sofreu uma redução de 76% se comparado à palha de cana (11,05%) e para o tratamento *flakes* (CDR com casca) de 2,20%, comparada à casca (13,2%), alcançou uma redução ainda melhor de 83%. Os resultados indicam, portanto, que o processo de extrusão em combinação com aquecimento contribuiu para a produção de

um combustível com melhor qualidade, pois reduziu seus valores de umidade. Outro aspecto favorável.

Como afirmam Bialowiec et al. (2017), a umidade é um dos parâmetros considerados fundamentais para a utilização de um material como fonte de energia. No mesmo estudo, chegaram a obter uma umidade de 1,4 %, mas esse ótimo resultado foi encontrado após a aplicação de processo de torrefação (secagem severa), processo no qual usualmente se mantém de 15 a 60 minutos em temperaturas entre 200 a 300 °C.

Infiesta et al. (2019) encontraram teor de umidade de 50% na entrada do processo de produção de CDR, mas que, ao final do tratamento proposto, encontraram apenas 15%. Com isso, comparativamente, pode-se observar que o teor de umidade médio do CDR (triturado e seco) encontrado anterior à extrusão (18,47%) já se aproximava da média do CDR da literatura. Todavia, Peters et al. (2020) encontraram um teor de umidade para o CDR de 43,1%, e Widyatmoko (2018), 19,27%.

Pode-se observar, portanto, que a possibilidade de combinar a incineração de RSU e de CDR para a recuperação de energia pode ser um método eficaz para a eliminação de resíduos, mas como afirmam Edo et al. (2016), a heterogeneidade e o alto teor de umidade tornam o pré-tratamento necessário para aprimorar suas propriedades como combustível.

5.3.4. Análise Imediata

A Tabela 26 apresenta a análise imediata dos tratamentos em formato de *flakes*.

Tabela 26 - Análise imediata dos tratamentos em formato de *flakes*

Tratamento	Teor de Voláteis (base seca) (%)	Teor de Cinzas (base seca) (%)	Teor de carbono fixo (%)
T1 - 100 % CDR	74,30 ± 0,29 ^{ab}	10,83 ± 0,40 ^{ab}	14,85 ± 0,09 ^a
T2 – 90% CDR com 10% de casca	71,50 ± 0,64 ^{ab}	13,30 ± 0,28 ^{ab}	15,19 ± 0,36 ^a
T3 – 75% CDR com 25% de casca	71,23 ± 2,72 ^b	13,42 ± 3,20 ^a	15,33 ± 0,48 ^a
T4 – 50% CDR com 50% de casca	75,29 ± 0,33 ^{ab}	8,64 ± 0,15 ^{ab}	16,06 ± 0,17 ^a
T5 – 90% CDR com 10% de palha	74,29 ± 0,65 ^{ab}	9,48 ± 0,07 ^{ab}	16,22 ± 0,72 ^a
T6 – 75% CDR com 25% de palha	76,10 ± 0,50 ^a	9,36 ± 0,38 ^{ab}	14,52 ± 0,12 ^a
T7 – 50% CDR com 50% de palha	75,54 ± 0,91 ^{ab}	8,40 ± 0,25 ^b	16,06 ± 0,67 ^a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

Ao comparar os sete tratamentos aplicados (Tabela 26), tem-se que todos são compostos, majoritariamente, por materiais voláteis (evaporam facilmente), em que T6 teve maior proporção, e valor relativamente próximo ao obtido por Edo et al. (2016), os quais encontraram 72,9% para o combustível densificado e testados por eles, bem como também ao encontrado por Bialowiec et al. (2017), 76 %.

Assim, ao observar que a maioria dos teores voláteis dos tratamentos em formato de *flakes*, exceto T3, não diferiram estatisticamente (5% de significância) entre si, e que atingiram valores próximos aos da literatura, pode-se supor conformidade quanto ao delineamento dos procedimentos experimentais adotados aqui, bem como aos resultados encontrados.

O material volátil consiste na porção da massa inicial, composto por materiais lábeis (pouco estáveis), perdidos durante a pirólise, cujo aumento de temperatura favorece a redução e a perda dessa fração do material (JOSEPH et al., 2009). Segundo McKendry (2002), o teor de voláteis também pode representar uma medida da facilidade com que a biomassa pode ser inflamada, a fim de determinar a sua utilização como fonte de energia.

Quanto ao teor de cinzas, parte do material pode estar diretamente relacionada com a presença de substâncias inorgânicas (POLASTRELI, 2019). Pode-se observar nos tratamentos que a fração de cinzas apresentou representatividade inferior aos teores voláteis e relativamente aproximadas ao carbono fixo (Tabela 27). Bialowiec et al. (2017) encontraram um teor de cinzas de 14,3 %; Gulyurtlu et al. (2006), por sua vez, 22,5%, Edo et al. (2016) 17,2% e Peters et al. (2020), 16,3%. O valor médio de teor de cinzas encontrado na literatura, foi de 17,58%. O valor médio encontrado (10,49%) sugere que a heterogeneidade do material leva a incertezas quanto a sua utilização como combustível.

Entretanto, na variação do teor de cinzas, observa-se que a maioria dos tratamentos propostos não diferem estatisticamente, e que houve duas classificações: T3 e T7 diferentes entre si. Os resultados mostram que, se aplicados os processos padrões, como secagem, segregação, trituração e extrusão, pode-se obter resultados mais homogêneos, o que levaria à redução das incertezas quanto à utilização dessas misturas.

Outra observação relacionada aos teores de cinzas são os valores obtidos em T4 e T7 (8,64% e 8,40%), ambos tratamentos com proporções (50% e 50%). A princípio, a expectativa inicial era de que quanto maior a quantidade de biomassa, maior o teor de cinzas. No entanto, vale resgatar que os teores de cinzas encontrados das biomassas, anteriormente às misturas produzidas, foram 1,57 % e 4,10 %. Esses valores associados ao perceptível fato da menor formação/densificação entre os fragmentos da referida proporção (50% e 50%), podem explicar os menores teores de cinzas encontrados, comparados aos demais tratamentos.

Todavia, outra hipótese que pode estar associada à variabilidade dos teores de cinzas encontrados para os sete tratamentos é a heterogeneidade presente tanto no CDR como das próprias biomassas aplicadas.

Segundo Foelkel (2010), que a casca de eucalipto é riquíssima em minerais, com cerca de 3 a 10% do seu peso composto por minerais, sob a forma de cinzas. Pires (2017), ao trabalhar com a pirólise da palha de cana, encontrou 4,88% do teor de cinzas para a palha seca, com possibilidade de aumento, em caso de carbonização parcial do material.

Dentre os fatores capazes de influenciar a variação do teor de cinzas, o tipo de colheita realizado é importante: a colheita mecanizada é muito mais favorável ao aumento de cinzas do que a manual, devido à menor contaminação da terra envolvida na retirada dos resíduos em campo (LUIS; JACOME, 2014; NAKASHIMA, 2016). Nesse aspecto, tanto o CDR como as biomassas, estão sujeitas a essa variação, de acordo com o tipo de armazenamento, retirada e/ou colheita.

O carbono fixo é o elemento em forma mais resistente, e que permanece na estrutura da biomassa, após a volatilização. Seu teor está diretamente relacionado à quantidade de calor gerado na combustão (AMONETTE; JOSEPH, 2009; RODRIGUES, 2018; YANG et al., 2006). Nas misturas das biomassas com CDR, a blenda com a casca de eucalipto apresentou, nesta etapa do estudo, média de proporção relativa ligeiramente menor (15,53%), em relação à blenda com a palha de cana (15,61%).

Guimarães Neto (2017) relatou a variação de carbono fixo entre 17,63% e 24,12%, para diferentes espécies de eucalipto, diferente de Brito e Barrichelo (1978), que apontaram um intervalo de 14,4% a 17,7%.

Na palha de cana, Conz (2015) relatou carbono fixo nulo, com aumento gradual em caso de pirólise da biomassa, para produção de biocarvão, o que indica a carbonização parcial da biomassa como uma alternativa, em casos cujo objetivo final seja a obtenção e uso do carbono fixo. Todavia, Pires (2017) encontrou 15,12% de teor de carbono médio da palha, semelhante em relação à esta etapa do presente trabalho.

Já o teor de carbono fixo encontrado para o CDR por Gulyurtlu et al. (2006) foi 9,3%; Edo et al. (2016), 3,3% e Peters et al. (2020), 5,4%. O valor médio de teor de carbono fixo encontrado na literatura, portanto, foi de 6,0% que, comparado ao valor médio encontrado aqui (15,47%), mostrou divergências, que também leva à supor serem atribuídas à heterogeneidade do CDR e também da casca e da palha de cana, bem como à quantidade e/ou fração das amostras utilizadas em cada análise. Contudo, pode-se observar que os valores de carbono fixo encontrados aqui não diferiram estatisticamente entre eles, o que leva à hipótese que a diferença existente não corresponde ao fator estudado em si, ou seja, a formação de misturas entre CDR e casca de eucalipto e CDR com palha de cana-de-açúcar, mas sim às características particulares de cada material.

5.3.5. Poder Calorífico Superior (PCS)

Os valores resultaram da média aritmética das duplicatas e seus desvios-padrão de cada um dos tratamentos em formato de *flakes*, estabelecidos nos testes (Tabela 27).

Tabela 27 - Poder Calorífico Superior (PCS) (médias aritméticas e respectivos desvios padrão de duplicatas) dos tratamentos em formato de *flakes*

Tratamento	PCS (J g ⁻¹)
T1 - 100% CDR	25.634 ± 28,99 ^a
T2 – 90% CDR com 10% de casca	22.379 ± 673,16 ^c
T3 – 75% CDR com 25% de casca	24.851 ± 149,19 ^{ba}
T4 – 50% CDR com 50% de casca	23.106 ± 50,20 ^c
T5 – 90% CDR com 10% de palha	23.729 ± 327,39 ^{bc}
T6 – 75% CDR com 25% de palha	23.204 ± 350,01 ^c
T7 – 50% CDR com 50% de palha	23.619 ± 358,50 ^{bc}

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Fonte: Próprio autor (2022)

Observa-se que o maior valor obtido foi T1. Na ordem, T3 foi o segundo maior e não difere estatisticamente de T1. Esse resultado não era esperado, pois tem menor proporção de CDR (75 %) comparado a T2 e T5 (90 %), os quais obtiveram valores inferiores e que não diferem estatisticamente entre si (5% de significância). A não linearidade dos resultados, também leva a supor serem atribuídas à heterogeneidade dos materiais utilizados: CDR, casca e palha de cana, bem como à quantidade e/ou fração das amostras utilizadas em cada análise.

O PCS médio dos *flakes* CDR com casca ficou em 23.446 (J g⁻¹) e a média dos *flakes* CDR com palha 23.518 (J g⁻¹). Os resultados mostraram, em sua maioria, *flakes* com poder calorífico inferiores aos encontrados por Bialowiec et al. (2017) 26.900 J g⁻¹, assim como por Gulyurtlu et al. (2006) 27.066 J g⁻¹, Edo et al. (2016) 35.430 J g⁻¹ e Peters et al. (2020) 40.593 J g⁻¹.

No entanto, se comparados com os resultados encontrados anteriormente à extrusão, para o eucalipto (18.035 J g⁻¹) (Tabela 28), foram superiores, assim como também aos encontrados na literatura, variável entre 16.630 J g⁻¹ (SHENG; AZEVEDO, 2005) a 18.520 J kg⁻¹ (CHUN-YANG, 2011). Além disso, também foram superiores aos valores encontrados anteriores à extrusão, para a palha de cana (18.616 J g⁻¹) (Tabela 28) e aos valores encontrados na literatura (15.630 J g⁻¹, SILVA et al., 2015; 17.490 J g⁻¹, PADILLA et al., 2016).

Os resultados e os valores da literatura mostraram que diversos fatores podem influenciar o poder calorífico de um material, bem como o teor de água, de voláteis, cinzas e carbono fixo, o que permite classificar a qualidade dos diferentes tipos de biomassas como combustíveis, conforme seu potencial energético (GUIMARÃES NETO, 2017).

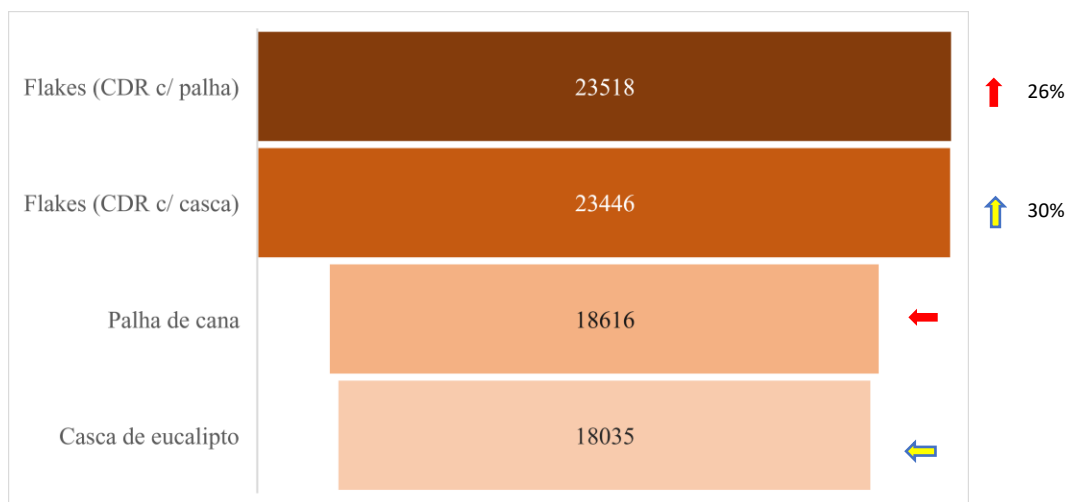
Tabela 28 - Valores médios para o Poder Calorífico Superior das biomassas casca de eucalipto de palha de cana-de-açúcar anteriores ao processo de extrusão e seus respectivos desvios-padrão

Material	PCS (J.g ⁻¹)
Casca de Eucalipto	18.035 ± 7,07
Palha de Cana-de-açúcar	18.616 ± 119,50

Fonte: Próprio autor (2022)

Desta forma, apesar das incertezas, impostas pelas diversas propriedades inerentes à definição da qualidade de um combustível, pode-se observar que os resultados do PCS para os tratamentos entre as misturas estudadas foram superiores aos das biomassas, encontrados anteriormente ao processo de extrusão. A Figura 62 apresenta o comparativo entre os valores médios de PCS encontrados.

Figura 62 – Comparativo entre valores médios de PCS dos tratamentos ($J g^{-1}$)



Fonte: Próprio autor (2022)

Ao compararmos a média do tratamento casca de eucalipto com CDR (pós-extrusão) *versus* casca de eucalipto (caracterização), o aumento foi de 30% e, ao confrontarmos a média do tratamento palha de cana-de-açúcar com CDR em relação à palha solteira (somente palha), o aumento foi de 26% (Figura 62).

Pode-se observar, portanto, que se obteve com as misturas propostas neste estudo, uma melhora da propriedade de poder calorífico, comparado às biomassas, resultado também favorável à utilização dos tratamentos propostos como combustível sobre esse aspecto.

5.4. CONCLUSÃO

Os tratamentos produzidos por meio do processo de extrusão apresentaram boas condições com a aplicação do CDR para a otimização do uso da palha de cana-de-açúcar e casca de eucalipto como fonte de energia térmica.

Não foi possível produzir as misturas de CDR com biomassa com o equipamento (aglutinador) disponível.

Em geral, tanto as misturas em forma de *flakes* ou pedaços demonstraram forte potencial como fonte de energia renovável.

Em forma de pedaços mesmo sendo os menores valores de densidade a granel encontrados, foram superiores aos materiais originais (triturados e secos). Podem ser facilmente armazenados, transportados e utilizados em processos de alimentação de caldeiras, seja por esteiras ou outros.

Os dados indicaram, portanto, a possibilidade real de produção de misturas entre CDR e biomassas, via processo de extrusão. O resultado é um combustível sólido de melhor qualidade: mais homogêneo, menor umidade, maior PCS e maior facilidade para estoque e manuseio.

5.5. Referências

AMONETTE, F. E; JOSEPH, S. **Characteristic of biochar: Microchemical properties**. In: Lehmann, J.; Joseph, S. *Biochar for Environmental Management – Science and Technology*, London: Earthscan, Cap.3, p.33-43. 2009.

AREIAS, A. A. **Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos; Sorocaba, 2020.

ÂRIÑA, D.; BENDERE, R.; DENAFAS, G.; KALNAČS, J.; KRIIPSALU, M. Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: The Case Studies in Latvia and Lithuania. **Environmental and Climate Technologies**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 112–118, 2020. DOI: 10.2478/rtuct-2020-0090.

ASTM D1102-84, ASTM. **Standard Test Method for Ash in Wood** 2021.

ASTM D293M-18. **Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke** 2010.

ASTM D5865-13, ASTM. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke** 2014.

ASTM E871-82. **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.

ASTM E872-82. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels** 2019.

BARTOS, A.; KÓCS, J.; ANGGONO, J.; MÓCZÓ, J.; PUKÁNSZKY, B. Effect of fiber attrition, particle characteristics and interfacial adhesion on the properties of PP/sugarcane bagasse fiber composites. **Polymer Testing**, [S. l.], v. 98, p. 107189, 2021. a. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107189.

BARTOS, A.; NAGY, K.; ANGGONO, J.; ANTONI; PURWANINGSIH, H.; MÓCZÓ, J.; PUKÁNSZKY, B. Biobased PLA/sugarcane bagasse fiber composites: Effect of fiber characteristics and interfacial adhesion on properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 143, p. 7, 2021. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106273.

BIAŁOWIEC, A.; PULKA, J.; STEPIEŃ, P.; MANCZARSKI, P.; GOŁASZEWSKI, J. The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [S. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.020.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E. **Características do eucalipto como combustível: Análise química e imediata da madeira e da casca**. IPEF, v. 16, p. 63-78, 1978.

CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. RDF production plants: I Design and costs. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 423–437, 2002. DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00100-4.

CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; VAN DER HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, n. February, p. 391–399, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.001.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2011.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e etanol no Brasil** Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, DF. Disponível em: <https://bit.ly/351fqPR>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CONAB. **Acomp_safra_bras_cana_v.7_Safra_2019_20_n.3_Terceiro_levantamento_Brasília_a_p_1-62**. Brasília, DF. Disponível em: <https://bit.ly/3nAkiBQ>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CONZ, R. F. **Caracterização de matérias primas e biochars para aplicação na agricultura**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz". Piracicaba, SP. 133p., 2015.

COSTA, A. O. DA, et al. **NT-Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2020>, 2021. /. Acesso em: 23 jul. 2021.

CHUN-YANG, Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses, **Fuel** 90, 1128-1132, 2011.

EDO, M.; BUDARIN, V.; ARACIL, I.; PERSSON, P.; JANSSON, S. The combined effect of plastics and food waste accelerates the thermal decomposition of refuse-derived fuels and fuel blends. **Fuel**, [S. l.], v. 180, p. 424–432, 2016. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.062.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto : Aspectos morfológicos , fisiológicos , florestais, ecológicos e industriais , visando a produção de celulose e papel. **Eucalyptus Online Book e Newsletter**, [S. l.], p. 109, 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3zI8zYO>. Acesso em: 23 jul. 2021.

GOLDEMBERG, J. Current and Prospects in the Use of Biomass for Energy Generation. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 15–28, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170004.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Potencialidade de uso bioenergético da madeira e da casca de *Eucalyptus* spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de curta rotação**. Tese de doutorado—Universidade Federal de Lavras. 110 p., 2017.

GULYURTLU, I.; CRUJEIRA, T.; LOPES, M. H.; ABELHA, P.; BOAVIDA, D.; SEABRA, J.; GONÇALVES, R.; SARGAÇO, C.; CABRITA, I. The study of combustion of municipal waste in a fluidized bed combustor. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, [S. l.], v. 128, n. 2, p. 123–128, 2006. DOI: 10.1115/1.2191507.

HRYB, W.; MATYASIK, P. Mercury content in refuse-derived fuels. **Archives of Environmental Protection**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 65–72, 2018. DOI: 10.24425/aep.2018.122304.

INFIESTA, L.; R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 236, p. 715–719, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.017.

JOSEPH, S. et al. Developing biochar classification and test methods. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S.(Ed). **Biochar for environmental management science and technology**. New York: Earthscan, p. 107-126. 2009.

KERDSUWAN, S.; MEENAROCH, P.; CHALERMCHAROENRAT, T. The Novel Design and Manufacturing Technology of Densified RDF from Reclaimed Landfill without a Mixing Binding Agent Using a Hydraulic Hot Pressing Machine. **MATEC Web of Conferences**, [S. l.], v. 70, p. 11003, 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20167011003.

LUIS, D.; JACOME, F. **Caracterização Físico-química das Cinzas de Palha de Cana-de-Açúcar Através de Análises Térmicas Simultâneas (STA)**. 2014. Universidade Estadual de Campinas, 2014.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass**. *Bioresource technology*. v. 83, n. 1, p. 37–54, 2002.

NAKASHIMA, G. T. **Use of sugarcane trash for solid biofuel production: physicochemical characterization and influence of storage time**. 2016, p 59. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2016.

PADILLA, E. R. D., et al. **Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar**. *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 13, p. 1334-1346, 2016.

PESSOA, J. S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

PETERS, J.; MAY, J.; STRÖHLE, J.; EPPLÉ, B. Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 18, p. 20, 2020. DOI: 10.3390/en13184665.

PINCELLI, A. L. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, [S. l.], v. 45, n. 115, p. 519–526, 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n115.09.

PIRES, I.C.S.A. **Produção e caracterização de biochar de palha de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)** 45 p. Tese (Mestrado em Ciências dos Materiais), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba 2017.

POLASTRELI, D. L. **Caracterização química de biocarvão proveniente da casca de eucalipto da espécie “*Eucalyptus grandis*” em diferentes condições de pirólise**. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde. Alegre- ES, 2019.

R Development Core Team (2019): **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, <https://www.rproject.org/>

RODRIGUES, L. D. **Contribuições para o estudo da pirólise da casca de eucalipto**. 73 p. 2018. Tese (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, 2018.

ROSSINI, E. L. **Obtenção da blenda polimérica PET/PP/PE/EVA a partir de “garrafas PET” e estudo das modificações provocadas pela radiação ionizante**. 2005. Universidade de São Paulo, [S. l.], 2005.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. 2014. Escola de Engenharia de São Carlos, [S. l.], 2014.

SANTOS, V. F.; OTTERBACH, J. C. H. **Agglutinação de filme de PVC**. Rio Grande do Sul, 2014.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy** 28, 499-507, 2005.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 713, 2015. a. DOI: 10.5380/rf.v45i4.39700.

WIDYATMOKO, H. Refuse derived fuel potential in DKI Jakarta. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Univ Trisakti, Fac Landscape Architecture & Environm Technol, Environm Engn Dept, Jakarta, Indonesia FU - Universitas Trisakti FX - Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/106/1/012099>.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy and Fuels**, v. 20, p. 388-393, 2006.

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram produzidos, por extrusão com aquecimento, e caracterizados, sete tratamentos, em formatos de *flakes*: T1 (100% CDR), T2 (90% CDR e 10% casca de eucalipto), T3 (75% CDR e 25% casca de eucalipto), T4 (50% CDR e 50% casca de eucalipto), T5 (90% CDR e 10% palha de cana-de-açúcar), T6 (75% CDR e 25% palha de cana-de-açúcar) e T7 (50% CDR e 50% palha de cana-de-açúcar) e outros seis tratamentos, em forma de pedaços, seguindo as mesmas proporções (de T2 a T7).

Ao considerarmos três importantes propriedades que auxiliam na avaliação qualitativa de um combustível: densidade, umidade e poder calorífico, pode-se afirmar que foram encontrados resultados favoráveis à utilização dos materiais estudados como fonte energética renovável.

As densidades médias dos tratamentos produzidos por extrusão, tanto dos *flakes* quanto dos pedaços foram superiores aos das biomassas: CDR, casca e palha, estudados individualmente. Ao comparar-se as densidades do tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) com o CDR (*in natura*), obteve-se um resultado aproximadamente 10 vezes maior, e ao comparar o tratamento em formato de pedaços (CDR com casca) com o CDR (*in natura*), o aumento de densidade foi de aproximadamente 9 vezes maior. Ao considerarmos a densidade como uma das propriedades relevantes, relacionadas ao armazenamento, transporte e, principalmente, manuseio, os tratamentos produzidos: *flakes* e pedaços, apontaram, portanto, para densidades e formatos favoráveis que podem servir como alternativa de combustível para altos-fornos nas indústrias cimenteiras e/ou em caldeiras.

A umidade encontrada para o tratamento produzido em formato de *flakes* (CDR com palha) atingiu uma redução de 76% se comparado à palha de cana e para o tratamento *flakes* (CDR com casca), comparada à casca, alcançou uma redução ainda melhor de 83%. Pode-se observar, portanto, que a extrusão com aquecimento, ajustado a 250 °C, contribuiu para a redução da umidade dos tratamentos propostos, aspecto relevante para a qualidade e otimização do combustível.

Os resultados quanto ao poder calorífico superior médio dos tratamentos em formato de *flakes* foram $> 22.379 \text{ J g}^{-1}$. Valores de PCS superiores aos das biomassas 18.035 J g^{-1} (eucalipto) e 18.616 J g^{-1} (palha de cana-de-açúcar). Ao compararmos a média do tratamento

casca de eucalipto com CDR (pós-extrusão) *versus* casca de eucalipto (caracterização), o aumento foi de 30% e, ao confrontarmos a média do tratamento palha de cana-de-açúcar com CDR em relação à palha solteira (somente palha), o aumento foi de 26%. Pode-se observar, portanto, que se obteve com as misturas propostas neste estudo, uma melhora da propriedade de poder calorífico, comparado às biomassas, resultado também favorável à utilização dos tratamentos propostos como combustível sobre esse aspecto.

Desta forma, apesar das incertezas impostas pela umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, pode-se observar que os resultados encontrados apontaram que a aplicação de CDR para a otimização do uso das biomassas: palha de cana-de-açúcar e casca de eucalipto como fonte de energia, pode ser uma alternativa.

Uma proposta de trabalho futuro seria o estudo de viabilidade econômica, considerando os investimentos necessários para a inserção e instalação de uma extrusora na linha de produção de CDR compatível. Além da extrusora, o estudo também deveria incluir a análise de melhoria do processo de segregação (metais, parafusos, cabos de aço, roldanas, tecidos, etc).

Outra sugestão de proposta de trabalho futuro é o estudo da resistência mecânica dos tratamentos, em forma de pedaços produzidos aqui, a fim de analisar a relação com sua viabilidade logística, já que se observou friabilidade (esfarelamento) nas misturas produzidas, principalmente naquelas com menor quantidade de CDR.

Pode-se concluir ainda, que a formação de misturas de CDR com casca de eucalipto, ou CDR com palha de cana, por extrusão com aquecimento, pode ser um método eficaz para a eliminação de resíduos. Contudo, a heterogeneidade, o alto teor de umidade e o formato dos respectivos materiais *in natura* tornam o pré-tratamento (segregação, secagem e trituração) necessário para a adequação ao processo e com isso, aprimorar suas propriedades como combustível.

Por fim, os resultados indicaram a possibilidade real de produção de misturas entre CDR e biomassas, via processo de extrusão. O resultado é um combustível sólido de melhor qualidade se comparado aos materiais individualmente (casca, palha e CDR), sendo, portanto: mais homogêneo, menor umidade, maior PCS e maior facilidade para estoque e manuseio.