



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Adilson Geraldo Machado

**Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos
combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina**

Araranguá
2022

Adilson Geraldo Machado

Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof. Elise Sommer Watzko, Dr.

Coorientadora: Prof. Elaine Virmond, Dr.

Araranguá

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

MACHADO, ADILSON GERALDO

Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina / ADILSON GERALDO MACHADO ; orientador, Elise Sommer Watzko, coorientador, Elaine Virmond, 2022.

159 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, , Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Combustível derivado de resíduos. 4. Recuperação energética. 5. Combustível compactado. I. Watzko, Elise Sommer . II. Virmond, Elaine. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Adilson Geraldo Machado

Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira, Dr.
UFSC (Florianópolis) - PPGENQ

Prof. Thiago Dutra, Dr.
UFSC (Araranguá) - PPGES

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Energia e Sustentabilidade.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Elise Sommer Watzko, Dr.
Orientadora

Araranguá
2022

À minha mãe Maria Marta (*in memoriam*), que me deu forças para continuar. E à minha família, em especial à minha amada esposa Elisangela, e aos meus filhos Marcos e Pedro, por todo amor, apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Professora Elise, que confiou nas minhas ideias desde a entrevista para a vaga no programa de pós-graduação. Mesmo sem a proximidade física, imposta pelo distanciamento social, devido a pandemia do COVID-19, nos muitos encontros virtuais, alguns minutos de conversa sempre alinhavam o trabalho à direção correta. Obrigado por acreditar e me incentivar, sou grato por seu profissionalismo e sua dedicação.

À professora Elaine, que, de forma harmoniosa, sempre me orientou com as melhores ideias para complementação do trabalho. Competência, profissionalismo e dedicação também são seus pontos mais marcantes. Muito mais que coorientadora, foi uma mestra e colega. Obrigado pelos alinhamentos no decorrer desta jornada.

Aos membros da banca examinadora, Prof^a Regina de Fatima Peralta Muniz Moreira e Prof. Thiago Dutra, que gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação.

Agradeço também a todos os meus colegas do NUDAPE, em especial Arthur, Everton e Joana, que me auxiliaram nesta jornada que é prover energia dos resíduos. E ao amigo Yuri, pelos trabalhos e disciplinas realizados em conjunto e, principalmente, pelo apoio no início dos trabalhos com resíduos, quando tudo era novidade.

À Diamante Energia, em especial ao Jefferson Oliveira, Nelson Hartmam e Julio Albien, pela oportunidade concedida para a realização deste curso, mesmo com as aulas em formato digital, não mediram esforços em apoiar e conceder esse tempo. Aos colegas da Diamante Energia, da UTLA e CEUT, em especial, Urias, Rodrigo, Fábio e Thuany pela ajuda na organização e realização dos ensaios no laboratório.

À minha família, por apoiarem e compreenderem o meu isolamento em inúmeras noites e finais de semana. À minha mãe deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, dadas em todos os dias que estivemos juntos. À minha amada esposa Elisangela, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em momentos difíceis que passamos nesta caminhada. Obrigado pela compreensão, mesmo sem a atenção devida e depois de tantos momentos de lazer perdidos. Aos meus filhos Marcos e Pedro, pela compreensão e, mais ainda, pelo amor incondicional.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, os meus mais sinceros agradecimentos.

Por fim, agradeço a Deus, pelo presente de estar vivo e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer...

RESUMO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um desafio atual para as nações e traz preocupações em nível nacional e internacional. Seu estudo requer atenção devido à sua complexidade científica e tecnológica, seus impactos sociais, ambientais e econômicos. Nesta dissertação, alinhou-se o gerenciamento de RSU com a produção energética, transformando resíduos em recursos alternativos, com valor e compatíveis com a aplicação em processos de geração de energia térmica típicos, de forma mais específica em co-combustão com carvão mineral nas caldeiras das usinas termelétricas da região em estudo. Usando a técnica de moldagem por compressão, foram preparados compactados misturando frações trituradas de rejeito da reciclagem de RSU e resíduos da produção agrícola do sul do estado de Santa Catarina. Para isso, foi determinado o quantitativo desses materiais na região, como parte da pesquisa. A fabricação dos compactados foi realizada com diferentes percentuais de RSU (0, 10% e 20%) e temperaturas de compactação (60 °C, 100 °C e 140 °C). Foram investigados a estabilidade dos compactados com exposição à umidade, a composição do combustível por análise imediata e elementar, resistência mecânica e densidade energética. Verificou-se que a temperatura de processamento em 100 °C garante melhores propriedades mecânicas e a adição de RSU moídos promoveu, para algumas amostras, além de uma melhor resistência mecânica, um maior poder calorífico (17,3 MJ/kg), bem próximo ao do carvão mineral da região sul de Santa Catarina (18,3 MJ/kg). Adicionalmente, o acréscimo de RSU à biomassa apresentou benefícios como combustível, contudo deve-se levar em consideração as emissões nocivas, como dioxinas, furanos e mercúrio, que devem ser tratadas na utilização final do produto. Assim sendo, esta pesquisa fornece uma alternativa de substituição imediata ao carvão mineral e reduz a demanda de espaço nos aterros sanitários, com possibilidade de substituição de uma fração de combustível fóssil por uma alternativa parcialmente renovável, iniciando um processo de transição energética regional, com contribuições ambientais, econômicas e sociais.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Combustível derivado de resíduos; Recuperação energética; Combustível compactado.

ABSTRACT

The management of municipal solid waste (MSW) is a current challenge for nations and raises concerns at national and international level. Its study requires attention due to its scientific and technological complexity, its social, environmental and economic impacts. In this dissertation, the management of MSW was aligned with energy production, transforming waste into alternative resources, with value and compatible with the application in typical thermal energy generation processes, more specifically in co-firing with mineral coal in boilers of the thermoelectric plants in the region under study. Using the compression molding technique, compacts were prepared by mixing crushed fractions of waste from MSW recycling and residues from agricultural production in the south of the state of Santa Catarina. For this, the quantity of these materials in the region was determined as part of the research. The manufacture of the compacts was carried out with different percentages of MSW (0, 10% and 20%) and compression temperatures (60 °C, 100 °C and 140 °C). The stability of the compacts with exposure to moisture, the composition of the fuel by proximate and ultimate analysis, mechanical strength and energy density were investigated. It was found that the processing temperature at 100 °C guarantees better mechanical properties and the addition of ground MSW promotes for some samples, in addition to better mechanical strength, a higher calorific value (17,3 MJ/kg), very close to that of mineral coal in the southern region of Santa Catarina (18,3 MJ/kg). Additionally, the addition of MSW to biomass presented benefits as a fuel, however, harmful emissions such as dioxins, furans and mercury, which must be treated in the final use of the product, must be considered. Therefore, this research provides an immediate alternative to coal and reduces the demand for space in landfills, with the possibility of replacing a fraction of fossil fuel with a partially renewable alternative, initiating a process of regional energy transition, with environmental, economic and social contributions.

Keywords: Urban solid waste; Refused derived fuel; Energy recovery; Compressed fuel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Hierarquia no gerenciamento de resíduos sólidos.....	18
Figura 2: Disposição final no solo - Brasil 2020.....	21
Figura 3: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2020.....	23
Figura 4: Diagrama de Van Krevelen.....	34
Figura 5: Produção de arroz - etapas. Palha usada para recomposição do solo.....	37
Figura 6: Rotas para emissões orgânicas e emissão de fuligem da combustão de biomassa...38	
Figura 7: Compactados de biomassa conformados com a utilização de prensa hidráulica.....	40
Figura 8: Péletes de plástico e biomassa.....	42
Figura 9: Diagrama do sistema de co-combustão com suas externalidades imediatas.....	44
Figura 10: Diagramas esquemáticos de configurações de co-combustão de carvão e biomassa: (a) direta, (b) indireta, (c) paralela.....	45
Figura 11: Emissões de NO _x e SO _x para queima de carvão mineral e misturas de resíduos....	47
Figura 12: Coleta e análise de dados de geração de resíduos sólidos no sul de Santa Catarina.	51
Figura 13: Preparação das matérias primas e caracterização – RSU e biomassa da rizicultura.	52
Figura 14: Triagem de RSU centro de coleta, processamento e reciclagem de RSU de Imbituba/SC.....	54
Figura 15: Amostragem de RSU.....	55
Figura 16: Etapas de coleta e separação do RSU.....	55
Figura 17: LECO TGA-701.....	58
Figura 18: Características dos materiais utilizados para produção dos combustíveis.....	62
Figura 19: Componentes utilizados na preparação dos compactados (papel/papelão; plástico mole; isopor e biomassa - casca e palha de arroz).....	63
Figura 20: Misturas empregadas na obtenção dos combustíveis derivados de RSU e biomassa compactados.....	63
Figura 21: Misturas preparadas para conformação dos compactados (0, 10% e 20% de RSU).	64
Figura 22: Prensa produzida para o estudo com medição de pressão aplicada (célula de carga) a esquerda. À direita, molde projetado para compactação.....	65
Figura 23: Dispositivo para medição de temperatura da amostra e estufa utilizada.....	66

Figura 24: Preparação do combustível compactado e caracterização.	68
Figura 25: Representação gráfica da ANOVA.	72
Figura 26: Resíduos produzidos por cidade na região sul de Santa Catarina - 2020.	76
Figura 27: Resíduos produzidos por habitante na região sul de Santa Catarina – 2020.....	77
Figura 28: Aterros Sanitários em Santa Catarina – destaque região sul.	78
Figura 29: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no sul de Santa Catarina.	80
Figura 30: Amostras de biomassa da rizicultura do sul de Santa Catarina – como recebida e moída (60 mesh).	84
Figura 31: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imbituba/SC-coleta 1.....	85
Figura 32: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imbituba/SC-coleta 2.....	86
Figura 33: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imbituba/SC-coleta 3.....	86
Figura 34: – Produção briquetes em 100°C (a partir da esquerda: 0, 10% e 20% de RSU)	89
Figura 35: Combustíveis derivados de RSU e biomassa compactados obtidos.	90
Figura 36: Gráfico de Van Klevelen com os produtos em estudo.....	93
Figura 37: Perfil termogravimétrico da mistura RSU (papel/papelão, plástico mole e isopor).	94
Figura 38: Perfil termogravimétrico da biomassa (casca arroz).....	95
Figura 39: Teor de cinzas – superfície de resposta.....	96
Figura 40: Resultados obtidos para o PCS da biomassa, RSU e misturas.	97
Figura 41: PCS – superfície de resposta.....	98
Figura 42: Resultados obtidos para o PCI da biomassa, RSU e misturas.	99
Figura 43: Testes de absorção de água antes (esquerda) e após secagem (direita).	101
Figura 44: Teste de absorção de água.....	102
Figura 45: Exemplo de absorção de umidade no trabalho de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015).	102
Figura 46: Teste de absorção de umidade – após 60 minutos.	103
Figura 47: Aumento de massa após 60 minutos de absorção de água – superfície de resposta.	104
Figura 48: Resultados da determinação da densidade e da expansão após 24 horas da conformação.	106
Figura 49: Durabilidade e densidade para temperaturas de compactação 100 e 140 °C.....	106

Figura 50: Método de análise para o teste de expansão.	107
Figura 51: Densidade dos compactados – superfície de resposta.....	108
Figura 52: Perda de material nos testes de resistência.....	110
Figura 53: Teste de durabilidade – superfície de resposta.....	111
Figura 54: Teste de intemperismo com os compactados.	112
Figura 55: Teste de expansão no intemperismo – superfície de resposta.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos RSU quanto aos riscos potenciais de contaminação ambiental. ...	24
Tabela 2: Poder calorífico inferior de alguns dos materiais encontrados nos RSU.	26
Tabela 3: Características principais das pesquisas consultadas que tratam da obtenção de combustíveis de RSU e biomassa nos últimos 11 anos.	29
Tabela 4: Composição da palha e da casca de arroz da região sul de Santa Catarina.	35
Tabela 5: Cidades que encaminham resíduos para Aterro de Pescaria Brava.....	79
Tabela 6: Composição gravimétrica de RSU bruto de alguns municípios do sul de SC.....	81
Tabela 7: Dados operacionais da cooperativa de tratamento de material reciclável da cidade de Imbituba / SC.....	82
Tabela 8: Dados de geração de resíduos da cidade de Imbituba / SC	82
Tabela 9: As 11 regiões mapeadas de cultivo de arroz e o total de Santa Catarina.	83
Tabela 10: Distribuição gravimétrica RSU – média.....	87
Tabela 11: Teor de umidade das frações de rejeitos de RSU.	88
Tabela 12: Resultados da caracterização química dos componentes e das misturas utilizadas na produção dos combustíveis compactados	91
Tabela 13: Padrões de qualidade de CDR na Europa (UNE-EN 15359, 2012).	99
Tabela 14: Classificação dos RSU com fins energéticos no Brasil.....	100
Tabela 15: Resultados de densidade e avaliação conforme metodologia adotada por Jewiarz et al. (2020) – valores aprovados.....	105
Tabela 16: Resultado dos testes de durabilidade dos compactados.....	109
Tabela 17: Teste de intemperismo.....	113
Tabela 18: Dados de geração de energia elétrica a partir de RSU e biomassa (região sul de Santa Catarina) em um ano de operação.	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB Associação Brasileira da Indústria de Biomassa
ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA Análise de variância unilateral
ASTM *American Society for Testing and Materials*
CDR Combustíveis Derivados de Resíduos
CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAGRO Cooperativa Agropecuária de Tubarão – SC
EEA Agência Ambiental Europeia
EPA Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPE Empresa de Pesquisa Energética
FBC Combustores de leito fluidizado (*Fluidized bed combustor*)
GEE Gases de Efeito Estufa
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOM Índice de combustão
IMA Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
LDPE Polietileno de baixa densidade
LLDPE Polietileno linear de baixa densidade
MSW *Municipal Solid Waste*
NBR Norma Brasileira Regulamentadora
ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU Organização das Nações Unidas
PCDD Dibenzo-*p*-dioxinas policloradas
PCDF Dibenzofuranos policlorados
PCI Poder Calorífico Inferior
PCS Poder Calorífico Superior
PE Polietileno (plástico)
PERS Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PNE Plano Nacional de Energia
PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP Polipropileno (plástico)
PS Poliestireno (plástico)

RDF *Refuse derived fuel*

RSU Resíduos sólidos urbanos

RSUE Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos

SGR *Straw to grain ratio*

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNS Secretaria Nacional de Saneamento

TGA Análise termogravimétrica (*Thermogravimetric analysis*)

URE Unidade de Recuperação Energética

VFBC Combustor de leito fluidizado de vórtice (*Vortexing Fluidized Bed Combustor*)

VPL Valor presente líquido

WtE *Waste to energy*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	PROBLEMÁTICA E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
2.2	ENERGIA NO BRASIL.....	22
2.3	RESÍDUOS.....	24
2.4	GERAÇÃO DE RESÍDUOS E ENERGIA	25
2.5	BIOMASSA E ENERGIA.....	33
2.6	COMPACTAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS.....	39
2.7	COMBINAÇÃO DE RSU E BIOMASSA.....	41
2.8	CO-COMBUSTÃO DE CDR EM UMA USINA A CARVÃO MINERAL	43
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
3.1	COLETA DE DADOS DE RESÍDUOS DA REGIÃO:.....	51
3.2	PREPARAÇÃO DO MATERIAL BASE:	51
3.2.1	Obtenção dos materiais:.....	52
3.2.1.1	<i>Resíduos sólidos urbanos</i>	<i>52</i>
3.2.1.2	<i>Biomassa da região:.....</i>	<i>56</i>
3.2.2	Secagem, determinação do teor de umidade e trituração amostras de RSU .	56
3.2.3	Análise imediata das amostras	57
3.2.4	Análise elementar das amostras	58
3.2.5	Determinação do poder calorífico das amostras.....	59
3.2.5.1	<i>Poder calorífico superior</i>	<i>59</i>
3.2.5.2	<i>Poder calorífico inferior.....</i>	<i>61</i>
3.2.6	Preparação do material a ser prensado	61
3.3	PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO COMPACTADO	64
3.4	MÉTODOS DE TESTE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RSU E BIOMASSA COMPACTADO	67
3.4.1	Teste mecânico de durabilidade	69

3.4.2	Densidade do compactado.....	69
3.4.3	Teste de absorção de água.....	70
3.4.4	Teste de intemperismo e umidade.....	71
3.4.5	Análise estatística.....	72
3.4.6	Estimativa da geração de energia elétrica a partir de RSU e biomassa	73
3.4.7	Custos operacionais para co-combustão de carvão com combustíveis de RSU e biomassa (CDR)	73
4	RESULTADOS	75
4.1	RESÍDUOS GERADOS NA REGIÃO DE ESTUDO.....	75
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DA RIZICULTURA DA REGIÃO	83
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO DE RECICLAGEM - RSU	85
4.4	PRODUÇÃO DOS COMPACTADOS:.....	89
4.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	90
4.5.1	Análise imediata e elementar	92
4.5.2	Poder Calorífico Superior (PCS).....	96
4.5.3	Poder Calorífico Inferior (PCI).....	98
4.6	TESTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	100
4.7	DENSIDADE	104
4.8	TESTE MECÂNICO DE DURABILIDADE	108
4.9	TESTE DE INTEMPERISMO E UMIDADE.....	111
4.10	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	114
4.11	EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL	115
4.12	UTILIZAÇÃO DO MATERIAL EM CO-COMBUSTÃO EM USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO	117
5	CONCLUSÃO	120
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS	122
	ANEXOS	137

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos é um desafio mundial atual, tanto para o descarte quanto em relação à geração de efluentes. Em uma outra esfera, o setor de energia reconhecidamente é um dos motores fundamentais para o desenvolvimento social e econômico para qualquer país. Estudos nessas áreas são importantes em qualquer nível da cadeia de produção, principalmente quando se relaciona a transformação energética com a redução de resíduos e menor degradação ao meio ambiente.

Com essa prerrogativa, propôs-se neste trabalho analisar a obtenção de um combustível para aplicação energética a partir de resíduos sólidos, mais especificamente, de resíduos sólidos urbanos (RSU) e de biomassa da produção agrícola regional. Dessa forma, esse estudo está alinhado a cinco Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU, 2021): 6) Água potável e saneamento, 7) Energia limpa e acessível, 11) Cidades e comunidades sustentáveis, 12) Consumo e produção sustentável e 13) Ação contra a mudança global do clima, enquadrando-se também como inovação no setor energético, principalmente quando comparado a outros trabalhos a nível nacional e regional.

Colaborações desse trabalho estão ligados às linhas de:

- ✓ Maior aproveitamento energético do RSU, com utilização dos resíduos na geração de energia e não a simples disposição em aterros sanitários;
- ✓ Menor impacto ambiental devido à destinação dos resíduos com melhor tratativa em relação à disposição no solo, opção na qual a geração de gases (em especial o metano) e de resíduos líquidos prejudiciais ao ambiente é muito superior àqueles oriundos da combustão para a produção de energia;
- ✓ Geração de emprego e renda local com a possibilidade de implantação de unidades de processamento e produção de combustíveis derivados de resíduos;
- ✓ Opção de combustível alternativo para a transição energética da região sul catarinense, que hoje tem no carvão mineral seu principal elemento energético;
- ✓ Relacionando-se ao item anterior, pode-se ainda enquadrar a aplicação do combustível derivado de resíduos na co-combustão com carvão mineral em unidades termelétricas como um item para diversificação das fontes de geração de energia elétrica para o país, que hoje é grandemente dependente da geração hidráulica, a qual se torna deficitária em períodos secos com queda dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Os benefícios da produção de combustível derivado de RSU e biomassa ainda podem ser relacionados à redução do volume de resíduos e das despesas das administrações municipais com sua disposição em aterros sanitários, e otimização da operação desses que, na maioria, tem como única receita aquela oriunda da disposição de RSU (PERS, 2018).

Espera-se, por parte do poder público e entidades privadas, um aquecimento dos investimentos no setor de gerenciamento de resíduos atrelada à geração de energia devido à recente aprovação da Lei 14.026 de 15 de julho de 2020 (BRASIL, 2020), a qual renova os prazos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos - PNRS, que estavam vinculadas à Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Linhas de estudo visando à aplicação comercial são indispensáveis e de grande validade, pois estarão consoantes com dois grandes problemas do Brasil, que são a deficiência no gerenciamento de resíduos sólidos e a necessidade diversificação e ampliação da oferta de energia para o desenvolvimento do país.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Obter combustíveis derivados do aproveitamento de frações não recicláveis de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) combinadas com biomassa (resíduos da rizicultura regional) no formato compactado visando à aplicação energética.

1.1.2 Objetivos Específicos

- 1) Levantar dados de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e biomassa da rizicultura na região sul catarinense;
- 2) Coletar e caracterizar amostras de biomassa da rizicultura e de rejeitos da etapa de triagem de RSU em termos de propriedades físico-químicas;
- 3) Preparar e caracterizar amostras de combustível compactado derivado de biomassa da rizicultura e rejeitos da etapa de triagem de RSU;
- 4) Avaliar a qualidade do combustível formado a partir de diferentes proporções de biomassa da rizicultura e rejeitos da etapa de triagem de RSU e diferentes temperaturas de compactação visando à obtenção de uma combinação que possa ser aplicada industrialmente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

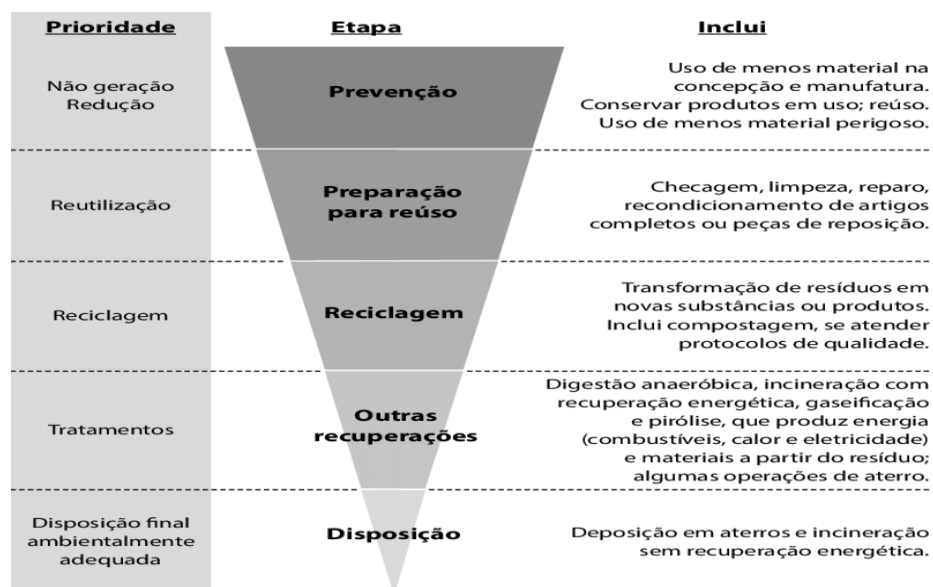
2.1 PROBLEMÁTICA E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Historicamente, os resíduos sólidos sempre foram um resultado indesejável de grande parte das atividades humanas. Diversos fatores como crescimento populacional, globalização, urbanização, entre outros, resultaram no aumento na quantidade e na diversidade dos resíduos sólidos gerados (GOUVEIA, 2012; ZAFARI e KIANMEHR, 2012; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; CHEN et al., 2020; SONG et al., 2020).

A literatura é clara em apontar que quase todas as cidades ao redor do globo possuem problemas relacionados a seus resíduos, com grande agravamento devido ao crescimento populacional e a melhora nos padrões de vida (GOUVEIA, 2012; KALINCI, 2018; CHEN et al., 2020). Ligado a isso, a gestão dos resíduos vem se tornando um desafio, tanto econômico quanto ao meio ambiente. O valor estimado da quantidade de resíduos gerados por ano no mundo é em torno de 2,2 bilhões de toneladas (INFIESTA et al., 2019).

A hierarquia no gerenciamento de resíduos sólidos foi primeiramente citada no início da década de 70, prevalecendo até os dias atuais (VIEIRA, 2019). Na apresentação da hierarquia da gestão dos resíduos sólidos, observa-se a representação em forma de uma pirâmide (Figura 1) com cinco alternativas, que correspondem às direções possíveis para se destinar os resíduos sólidos.

Figura 1: Hierarquia no gerenciamento de resíduos sólidos.



Fonte: PALERMO e GOMES (2017).

No ponto mais baixo encontra-se a alternativa menos recomendável ou não recomendável, que seria a “Disposição” em aterros, considerada uma forma inadequada de destinação dos resíduos (BRASIL, 2011). De forma análoga, no topo nota-se a redução da geração dos resíduos como alternativa fortemente recomendada e mais indicada, pois visa diminuir a quantidade de resíduos a serem destinados para as demais alternativas. Entre a base e o topo encontram-se as demais alternativas, seguindo de forma ascendente em direção ao topo da alternativa menos adequada para a mais adequada.

Um conceito atual e que está sendo amplamente utilizado na gestão de resíduos é o termo economia circular, que é uma alternativa à economia linear, tradicionalmente aplicada. A economia linear é baseada na produção-utilização-disposição, já a economia circular visa minimizar o uso de novos recursos pela reutilização e valorização dos produtos e materiais em fim de vida, evitando assim a criação de resíduos, poluição e emissão de gases de efeito estufa (ABREN, 2020). Portanto, o reaproveitamento desse material se enquadraria como uma possibilidade de energia renovável, que está se tornando cada vez mais inevitável, tendo em vista a necessidade cada vez maior de energia, do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e das preocupações ambientais (FAIZAL et al. 2016; INFIESTA et al. 2019; SONG et al. 2020).

Mesmo seguindo o princípio dos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) integralmente, ainda restará uma fração de material, a qual não é passível de reutilização nem reciclagem, denominada rejeito. Isso pode ocorrer devido ao fato do resíduo ser constituído de mais de um tipo de material, por falta de tecnologia e/ou mercado disponíveis para a reciclagem, dentre outros fatores. A principal causa identificada para a geração de rejeitos é a destinação incorreta por parte da população, seguida da falta de comércio aos materiais recicláveis (CEMBRANEL et al., 2021). A maior fração dos resíduos pós-reciclagem (20-40%, em média) são compostos químico-orgânicos de carbono e hidrogênio (combustíveis) e geralmente acabam em aterros. É necessário desenvolver logística e planejamento para essa fração (SOMPLAK et al., 2014).

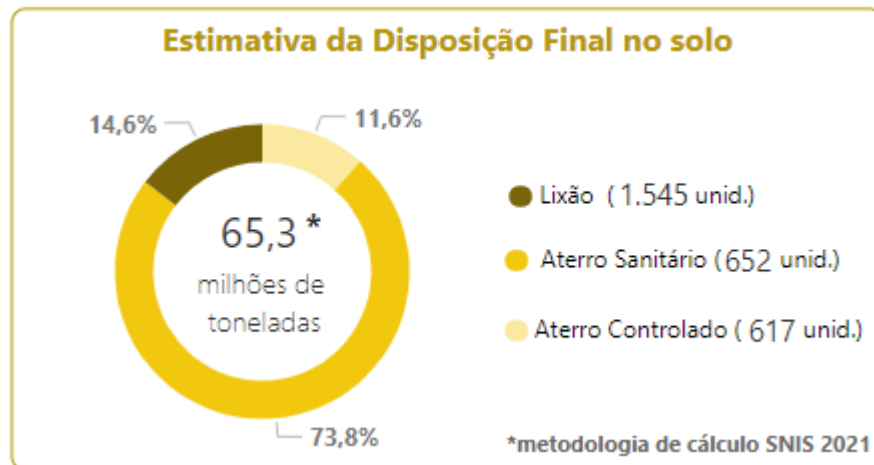
O Brasil é um país em desenvolvimento, com uma renda média relativamente baixa, mas, com relação à geração de resíduos sólidos urbanos (*per capita*) se equipara aos países desenvolvidos (CETRULO et al., 2018). O país é o quinto maior país do mundo com base em características geográficas e o sexto maior do mundo em economia. Politicamente está dividido em 27 estados, com mais de 5 mil municípios e uma população estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em cerca de 212 milhões de habitante em 2020.

Comparando a sua projeção populacional, há estimativas de que cada habitante seja responsável pela geração de cerca de 1 kg de resíduos sólidos urbanos diariamente (ABRELPE, 2019), o que equivale assumir que cerca de mais de 200 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos são geradas por dia no país (aproximadamente 73 milhões em um ano). Como não poderia ser diferente, atualmente, um dos maiores desafios das cidades brasileiras é gerenciar adequadamente esses resíduos sólidos coletados diariamente pelo país (BESEN e FRACALANZA, 2016). A coordenação da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil é de responsabilidade do poder público. Segundo Guerrini et al. (2017) o poder público possui diversas escolhas para aprimorar a eficiência do gerenciamento dos resíduos sólidos, dentre elas, incluem-se inovações tecnológicas, treinamento de pessoas e o desenvolvimento de um sistema de controle para incorporação eficaz e eficiente de processos. O destino atual para a grande parte dos RSU gerados no Brasil são os aterros sanitários, em que os rejeitos são degradados no decorrer de muitos anos, dependendo de sua composição, apresentando riscos ambientais e de longo prazo, a serem deixados para as gerações futuras.

Segundo a Abrelpe (2019) a prática de destinação de resíduos para aterros representa um alto custo financeiro para os municípios. Em 2018, os municípios brasileiros aplicaram mensalmente, em média, R\$ 10,15 por habitante para realização dos serviços de limpeza urbana. O mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$ 28,1 bilhões no país nesse mesmo ano. Ainda em 2018, pelos dados informados por 259 dos 295 municípios de Santa Catarina ao Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS Resíduos Sólidos Urbanos), foram gastos mais de R\$ 607 milhões com serviços administrativos de coleta e disposição de RSU, com despesa média per capita de R\$ 139,36 (BRASIL, 2019). Criciúma, Araranguá, Laguna e Tubarão juntos somaram mais de R\$ 28 milhões, aproximadamente 5% da despesa total do estado (BRASIL, 2019), parte desse grande investimento anual para aterrar RSU.

Segundo a Agência Ambiental Europeia (EEA), com o aumento dos índices de tratamento e queda de 60% na destinação de RSU aos aterros na Europa, entre 1995 e 2017, verificou-se uma redução de 42% nas emissões de gases de efeito estufa a partir de RSU para esse mesmo período (EUROSTAT, 2019). A capacidade dos aterros para lidar com os resíduos produzidos pela sociedade é limitada devido ao espaço necessário e à poluição resultante do solo, da água e do ar. Em algumas regiões do Brasil, tem-se situações ainda mais críticas, como a destinação dos resíduos para lixões (mesmo proibido por lei), sem os mínimos cuidados necessários (Figura 2).

Figura 2: Disposição final no solo - Brasil 2020.



Fonte: SNIS (2021).

Em face da emissão do metano (CH_4) gerado nos aterros, que é 25 vezes mais nocivo do que o gás carbônico (CO_2) para o aquecimento global (GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M., 2015), tem-se ampliado a busca por alternativas a esse tipo de destinação. O tratamento de resíduos das regiões metropolitanas brasileiras com mais de 1 milhão de habitantes teria potencial de evitar a emissão de cerca de 58 milhões de toneladas de “ CO_2 equivalente” anuais (BRASIL, 2007).

Espera-se que a política nacional brasileira seja estimulada por essas gestões, com novas ações de apoio a reutilização de resíduos, em especial à geração de energia. Nessa linha, a implantação de políticas de aproveitamento é tanto favorável economicamente como ambientalmente.

Com relação ao estado de Santa Catarina, pode-se destacá-lo no cenário nacional no tratamento do RSU, sendo pioneiro no encerramento de lixões em 2014. O aproveitamento e a conversão dos resíduos nos aterros sanitários do estado pode ser uma excelente alternativa de desenvolvimento para o setor. O sul do estado possuía no ano de 2018 três grandes aterros sanitários cadastrados no Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS, 2018), sendo responsáveis por centralizarem o RSU do entorno de sua localização (cidades vizinhas).

Além da questão ambiental, pode-se elencar ainda benefícios da gestão de resíduos na questão social. A crise econômica provocada pela Pandemia de COVID-19, impactou na perda de 13,5 milhões de postos de trabalho (VALOR ECONÔMICO, 2020). Com isso, tem-se cada vez mais pessoas desenvolvendo atividades informais. A produção de combustível alternativo a partir do RSU pode, de alguma forma, favorecer a criação de postos de trabalho

na região, seja na triagem, seja na produção dos combustíveis compactados. Em estudo realizado pela Comissão Europeia, indicou-se que a recuperação energética de 10 mil toneladas de resíduos poderia ser capaz de criar até 40 postos de trabalho, sendo responsável por melhorar o desenvolvimento da região em que está inserida (ESTADÃO, 2020). Complementa-se a importância do tratamento e da destinação correta dos resíduos urbanos também como forma de evitar o contágio por agentes patogênicos, dado a atual situação da pandemia de COVID-19 e possíveis disseminações de outras doenças através desses materiais.

O tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) exige novas perspectivas, não só para o seu tratamento, mas na geração de valor nessa cadeia. É preciso melhorar o setor em termos de coleta e tratamento desse material, no entanto, estudos dedicados a quantificar e caracterizar RSU para posterior aplicação energética ainda são escassos na literatura científica brasileira.

Outro ponto relacionado à geração de resíduos sólidos no sul do estado de Santa Catarina está relacionado à grande produção agrícola de arroz e derivados de madeira. Esse setor também gera uma série de resíduos (palha, casca de arroz e serragem de madeira) que são subutilizados e poderiam ser encaminhados para a produção de energia. Como uma das justificativas para a utilização energética desses materiais, cita-se estudos (LIMA, 1997; AGOSTINETTO et al., 2002; MORTELE, 2011) que apontam o cultivo de arroz irrigado por inundação como responsável pela emissão de 10% a 16% do metano produzido em todo o país, sendo a produção desse gás vinculada, em grande parte, à decomposição dos resíduos nos campos de cultivo.

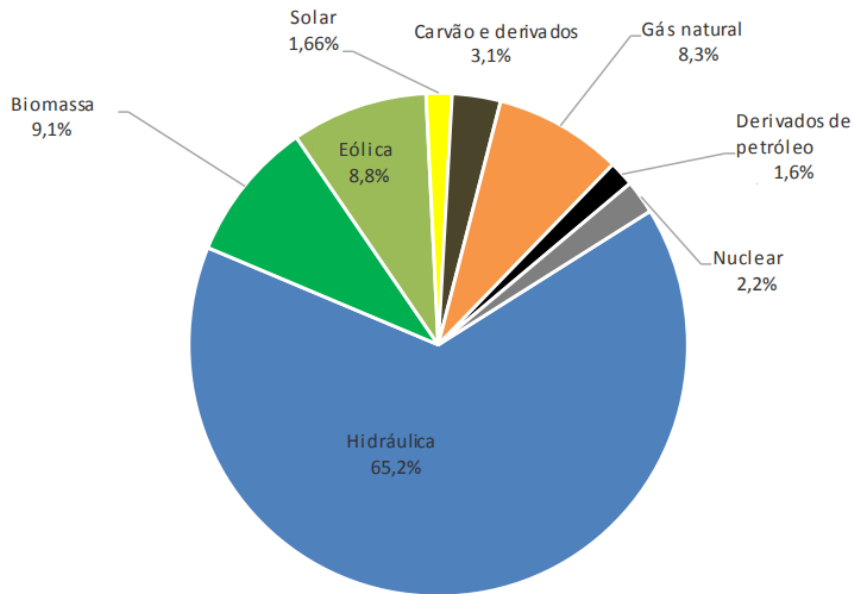
2.2 ENERGIA NO BRASIL

O Brasil tem sido o líder mundial em agroenergia nas últimas décadas. A oferta interna de energia no Brasil em 2020 foi de 287,6 milhões toneladas equivalentes de petróleo, sendo as fontes renováveis responsáveis por 48,4% desse montante, de onde 12,6% são provenientes de fonte hidráulica e eletricidade, 8,9% de lenha e carvão, 19,1% de produtos derivados da cana-de-açúcar e 7,7% de outras fontes renováveis (EPE, 2021).

Em relação à matriz elétrica, o Brasil dispõe de origens predominantemente renováveis, com destaque para a fonte hídrica que respondeu por 65,2% da oferta interna em 2020 (Figura 3). As fontes renováveis representaram 84,8% da oferta interna de eletricidade

no Brasil nesse mesmo ano, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2021).

Figura 3: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2020.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021).

Com relação à geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU), dentro de uma perspectiva de longo prazo, o Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 (EPE, 2007) considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos 25 anos em termelétricas utilizando resíduos, sendo assim, são esperados avanços importantes no aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Logo, estudos nessa área são importantes para preparação dessa futura utilização, voltada à aplicação energética do RSU no leque de opções energéticas do Brasil. Isso é fundamentalmente importante considerando-se a necessidade de despacho de termelétricas em períodos de baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas. Um combustível em parte renovável pode substituir (mesmo que parcialmente) os combustíveis fósseis convencionais nas termelétricas atuais.

2.3 RESÍDUOS

Segundo Souto e Povinelli (2013) além da vasta diversidade dos resíduos deve ser considerada uma constante mudança em suas características, na composição de suas frações e até mesmo variação na quantidade de resíduo gerada. Isso se deve à característica de acompanhamento do comportamento da sociedade, bem como tendências tecnológicas e aspectos culturais, como exemplo dos telefones celulares e computadores, que culminaram no descarte de grandes quantidades desses aparelhos quando da sua superação tecnológica.

Os resíduos sólidos segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da Norma Brasileira Regulamentadora NBR 10.004, de 2004 são definidos como sendo os resíduos provenientes de atividade agrícola, industrial, hospitalar, doméstica, comercial, de serviços de varrição, os lodos oriundos dos sistemas de tratamento de água e efluentes, além de determinados resíduos que são gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como líquidos os quais seu lançamento na rede de esgoto ou nos corpos hídricos se torne inviável em decorrência de peculiaridades (ABNT, 2004). A Tabela 1 destaca a classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) quanto ao seu potencial de contaminação ambiental.

Tabela 1: Classificação dos RSU quanto aos riscos potenciais de contaminação ambiental.

Categoria	Características
Classe I Perigosos	Apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe II	Não perigosos
Classe II-A	Podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, porém, não se enquadram como resíduos perigosos.
Classe II-B	Não tem constituinte algum solúvel em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas, após caracterização por teste específico de solubilização.

Fonte: ABNT (2004).

Um outro fator relevante a se considerar especificamente em relação aos resíduos plásticos é que, até o ano de 2015, estima-se que foram produzidos 8300 milhões de toneladas métricas de plásticos virgens, dos quais apenas 9% foram reciclados, 12% foram incinerados e 79% foram acumulados em aterros em todo o mundo (SONG et al., 2020). Desde 2000 até 2020, mais plástico foi produzido do que nos 50 anos anteriores (ATLAS DO PLÁSTICO,

2020). Os termoplásticos contribuem com cerca de 80% do consumo total de plástico e são geralmente usados em embalagens, construção e bens de consumo (GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017). Mais de 30% dos produtos termoplásticos são descartáveis; esses plásticos são excelentes candidatos para conversão em energia elétrica ou aquecimento local por causa de seu maior poder calorífico e o fácil manuseio. Os materiais plásticos comuns, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS), usados em embalagens têm maior calor de combustão do que o carvão mineral comercial e quase tanta energia quanto o óleo combustível, podendo ser uma opção viável para alguns plásticos reciclados, tendo-se um menor risco ambiental. Deve-se excluir dessa listagem o cloreto de polivinila (PVC) e outros plásticos halogenados que liberam dioxinas e outros orgânicos tóxicos (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017).

A situação atual de pandemia fez com que as pessoas utilizassem máscaras faciais como forma de proteção. Estudos apontam que, no mundo, consome-se cerca de 129 bilhões de máscaras por mês. No Brasil, o consumo mensal de máscaras seria de 3,5 bilhões por mês. Percebeu-se também aumento significativo no consumo dos plásticos de curta duração, como embalagens plásticas e descartáveis, a partir do aumento nos gastos com *delivery* (MAPA DO PLÁSTICO, 2020).

2.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS E ENERGIA

A experiência internacional (União Europeia, Estados Unidos, China, Índia, entre outros) indica que a produção em massa de resíduos, proveniente do rápido crescimento da população mundial urbana e do consumo de bens, pode ser associada à transformação desses resíduos em energia. Esses países incluíram a recuperação energética como priorização no tratamento de resíduos que, além de obterem uma destinação sustentável, contribuem para a geração de energia elétrica, em parte renovável e firme, atribuindo maior confiabilidade e estabilidade ao sistema elétrico (GUG, J., CACCIOLA, D. e SOBKOWICZ M., 2015; SONG et al, 2020).

No Brasil, a crescente necessidade de organização do setor foi refletida na criação da norma NBR 16849 (Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos), em fevereiro de 2020. Essa norma traz definições claras e abrangentes sobre os requisitos de aceitação de resíduos para o preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE)

de forma prática e segura, bem como a definição das classes dos lotes desse tipo de resíduo, sendo uma nova referência para a crescente indústria energética a partir de resíduos sólidos urbanos (ABNT, 2020). A norma abrange os aspectos de elegibilidade de resíduos, registros e rastreabilidade, amostragem e formação dos lotes, armazenamento, preparo de resíduos sólidos urbanos, classificação dos lotes gerados e uso do RSUE nas unidades de recuperação energética (URE), conforme a cadeia de custódia, respeitando a hierarquia de gestão e gerenciamento de resíduos (ABNT, 2020).

A eficiência do processo de aproveitamento energético do RSU é fortemente dependente do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos materiais a serem incinerados, isto é, a quantidade líquida de energia que se pode obter dos resíduos. Alguns dos materiais presentes nos RSU apresentam PCI acima de 6.000 kcal/kg (25 MJ/kg), equiparando-se aos valores de PCI de alguns combustíveis fósseis (ROSSI, 2014). A Tabela 2 apresenta o poder calorífico de alguns componentes encontrados nos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Tabela 2: Poder calorífico inferior de alguns dos materiais encontrados nos RSU.

Material	MJ/Kg (kcal/kg)	Referências
Plástico – PE	46,3 (11.058)	Gug et al. (2015)
Plástico – PP	46,2 (11.035)	Gug et al. (2015)
Plástico – PET	25,6 (6.114)	Gug et al. (2015)
Plástico – PS	41,4 (9.888)	Gug et al. (2015)
Mistura de plásticos*	26,3 (6.282)	Rossi (2014)
Borracha*	28,3 (6.759)	Rossi (2014)
Couro*	15,2 (3.630)	Rossi (2014)
Têxteis*	14,5 (4.363)	Rossi (2014)
Madeira*	10,5 (2.508)	Rossi (2014)
Alimentos*	5,5 (1.314)	Rossi (2014)
Papel*	16,8 (4.013)	Rossi (2014)
Lixo doméstico	18.6 (4.443)	Gug et al. (2015)

Fonte: ROSSI (2014) e GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ (2015). *Base úmida.

Considerando o elevado poder calorífico dos materiais plásticos, que está na faixa de 18-46 MJ/kg, a recuperação de energia é uma opção atrativa para esta fração (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; REZAEI, et al., 2020; SONG et al., 2020). O uso desses materiais baratos e de baixa qualidade em uma mistura combustível pode melhorar as características energéticas dos combustíveis contendo

biomassa, além de ser uma forma de descarte desses resíduos. No entanto, a influência do uso de plásticos na eficiência da combustão e no aumento dos poluentes tóxicos do ar ainda deve ser melhor investigada (MÜNSTER e LUND, 2010; GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ., 2015; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; MARTINHO et al, 2019).

Os resíduos sólidos urbanos têm em uma gama de países, especialmente no norte da Europa, desempenhado um papel significativo como fonte de energia por meio da incineração. Na Dinamarca, a incineração de resíduos supria no ano de 2011 cerca de 5% da demanda de eletricidade e cerca de 20% da demanda de aquecimento do país. Nesse mesmo país, a proibição do aterro sanitário de resíduos combustíveis a partir de 1997 transferiu os resíduos combustíveis de aterros sanitários para usinas de incineração, o que significa que a incineração de resíduos com recuperação de energia é, na prática, a tecnologia de tratamento de referência para resíduos sólidos urbanos. Nos países do sul da União Europeia, o RSU é frequentemente pré-tratado para produzir combustíveis derivados de resíduos (CDR) para incineração, enquanto a fração orgânica é separada mecanicamente, biologicamente estabilizada e encaminhada para aterro (FRUERGAARD e ASTRUP, 2011).

A geração de energia térmica e elétrica a partir dos resíduos sólidos data do início do século XIX (McDOUGALL et al., 2001). A conversão da fração de resíduos sólidos não passível de reutilização em energia, calor ou combustível pode se dar por intermédio de uma variada gama de processos que inclui desde a combustão, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbia e a recuperação do biogás formado nos aterros sanitários (EPA, 2016).

De acordo com Moratorio, Rocco e Castelli (2012) a conversão biológica se dá por meio de degradação biológica dos resíduos, sendo realizada por bactérias, via digestão anaeróbia. Esse é o processo que ocorre nos aterros sanitários e é responsável pela geração de biogás. Já em se tratando dos processos de conversão térmica, esses consistem basicamente em submeter os RSU a reações termoquímicas, de modo que sejam convertidos em produtos sólidos, líquidos e gasosos. As reações químicas que ocorrem nos processos de combustão e gaseificação são reações exotérmicas, portanto, ocorre a liberação de energia de maneira direta. No entanto, no processo de pirólise tem-se reação do tipo endotérmica, sendo necessário aportar energia para sua ocorrência, podendo essa derivar da combustão de parte do próprio do combustível ou de outra fonte.

A construção e a operação de instalações industriais tecnicamente sofisticadas usando combustão direta de RSU são comercialmente caras (GLUSHKOV, D., KUZNETSOV, G. e PAUSHKINA, K., 2020). Além disso, a geração de eletricidade com essa tecnologia também

requer investimentos no desenvolvimento de turbinas a vapor projetadas para parâmetros (pressão e temperatura) relativamente baixos de vapor d'água. Outro problema técnico, envolvendo grandes investimentos, são os rígidos requisitos de limpeza dos gases de combustão (GLUSHKOV, D., KUZNETSOV, G. e PAUSHKINA, K., 2020).

Outro ponto em relação à queima exclusiva do RSU é que, às vezes, combustíveis auxiliares são usados juntamente com o RSU durante a incineração, porém vale ressaltar que o uso de combustíveis auxiliares não é necessário quando o PCI dos resíduos ficar entre 1.000 kcal/kg (4,18 MJ/kg) e 1.700 kcal/kg (7,11 MJ/kg) ou superior (KUMAR e SAMADDER, 2017).

Apesar de estar abaixo do nível redução, reutilização e reciclagem na cadeia hierárquica de gerenciamento dos resíduos sólidos, a recuperação energética está acima do tratamento e da disposição final dos RSU em aterros. Desse modo, destaca-se que a combustão dos RSU não apenas reduz o volume encaminhado para os aterros sanitários como também possibilita recuperar energia desses resíduos (EPA, 2016).

As principais pesquisas encontradas a nível mundial que trataram da obtenção de combustível derivado de resíduo nos últimos 11 anos como meio eficiente de gerenciamento de resíduos sólidos, foram apresentadas na Tabela 3. Nesses trabalhos destacam-se em comum a preocupação com o tratamento dos resíduos sólidos urbanos e o aproveitamento energético desse material. Outro ponto importante é a visão de alguns trabalhos com relação às emissões, onde apresentam-se resultados opostos para alguns itens, como dioxinas, furanos e óxidos de enxofre (SO_x) em diferentes estudos. Algumas análises realizadas a nível laboratorial apresentaram aumento de emissões, enquanto outros trabalhos, em especial aqueles realizados a nível industrial, apresentaram redução nos níveis de emissão de poluentes. É notória a importância do assunto a nível mundial, dado a presença de trabalhos em vários países e em praticamente todos os continentes.

Tabela 3: Características principais das pesquisas consultadas que tratam da obtenção de combustíveis de RSU e biomassa nos últimos 11 anos.

Trabalho	Ano	País	Objetivo do trabalho	Matérias primas	Ganhos ambientais	Ganhos energéticos	Ganhos sociais	Impactos negativos
ZAFARI, A., e KIANMEHR, M. Effect of raw material properties and die geometry on the density of biomass pellets from composted municipal solid waste. BioResources.	2012	Irã	Verificar a eficácia de um processo de densificação para diferentes condições de densificação e matéria-prima.	Matéria orgânica ou resíduos biodegradáveis, como resíduos urbanos, animais esterco e resíduos de colheita.	Menor disposição em aterros sanitários.	Aproveitamento energético do combustível.	-	-
NIDHI, C.; SHARMA, B.; SINGH, PK. ENERGY VALUE IN BIOMASS AND PLASTIC COMPONENTS OF MUNICIPAL SOLID WASTE. International Journal of Science and Technology	2017	Índia	Estudar o valor energético de um combustível obtido de biomassa selecionada e dois materiais plásticos.	Biomassa selecionada (folhas secas de jardim) e dois materiais plásticos, polietileno de baixa densidade (LDPE) e poliestireno (PS)	80% resíduos para aterros; redução da queima do RSU nas ruas;	Utilização de plásticos -polietileno (LDPE) e poliestireno (PS) para aumento energético da biomassa.	-	-
SONG, Bing et al. Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics. Fuel	2020	Nova Zelândia	Desenvolver um novo método de extrusão a quente para uma mistura de plásticos e serragem.	Termoplásticos, polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), polipropileno (PP) e serragem	Redução uso combustíveis fósseis e emissão de gases. Uso de biomassa e RSU nas caldeiras convencionais de carvão.	Densificação energética com reaproveitamento energético.	Aproveitamento dos resíduos florestais.	Alta umidade da matéria prima.

Trabalho	Ano	País	Objetivo do trabalho	Matérias primas	Ganhos ambientais	Ganhos energéticos	Ganhos sociais	Impactos negativos
GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. Waste Management	2015	EUA	Transformar resíduos em briquetes compatíveis com os processos típicos de combustão do carvão mineral.	Resíduos com alto teor de papel e fibra foi combinado com níveis controlados de plásticos recicláveis PE, PP, PET e PS	Redução dos aterros sanitários. EUA usa 30% de termoplásticos não recicláveis que podem ser utilizados.	Converter RSU em combustível. Uma ton. de RSU gera em média 650 kW de eletricidade (EUA).	Aumento da geração de RSU a nível mundial. Nos EUA 54% vai para aterros sanitários. Eliminação de patógenos do RSU.	Riscos ambientais na queima de plásticos. Especialmente PVC pelo conteúdo de Cloro.
FAIZAL, H.M et al. Development of palm biomass briquettes with polyethylene plastic waste addition. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)	2016	Malásia	Obtenção de combustível por briquetagem de biomassa com adição de resíduos de plástico. Estudo da combustão desse material obtido.	Biomassa de palmeira, resíduos de plástico - polietileno (PE)	Redução da utilização de combustíveis fósseis (finitos). Aproveitamento do resíduo do óleo de palma.	Densificação energética. Facilidade de transporte e utilização. Recuperação energética.	Redução da disposição de RSU.	Uso de plástico faz com que briquetagem utilize temperatura mais altas (gasto de energia).
GARRIDO, M.A; CONESA, J.A; GARCIA, M.D. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic. Wastes Energies	2017	Espanha	Investigar as propriedades físicas dos briquetes produzidos a partir de duas biomassas diferentes com diversos resíduos plásticos, sem a utilização de nenhum agente ligante.	Biomassa (serragem e tronco de tamareira) e diversos resíduos plásticos (Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e trituração de plástico veicular)	Aumento da produção de resíduos da sociedade. Reaproveitamento do material de equipamentos eletrônicos e veiculares.	Resíduos utilizados eram queimados sem recuperação energética.	Fonte para crescente demanda de energia mundial.	Limitação quanto a utilização de plásticos com halogênios. Maior uso de energia para conformar o briquete de plástico.

Trabalho	Ano	País	Objetivo do trabalho	Matérias primas	Ganhos ambientais	Ganhos energéticos	Ganhos sociais	Impactos negativos
JEWIARZ, M., MUDRYK, K., WRÓBEL, M., FRĄCZEK, J. & DZIEDZIC, K. 2020. Parameters Affecting RDF-Based Pellet Quality. Energies	2020	Polônia	Estudo sobre a produção de pelotas de CDR, com testes em escala de laboratório para fornecer informações sobre os principais fatores que afetam a qualidade do pellet. Também apresenta um projeto de matrizes modificadas para formar pelotas otimizadas.	RSU é composto de materiais volumosos, como elementos de plástico ou tecidos têxteis retalhados.	Uso de RSU somente de 30% na Polônia, sendo o restante incinerado.	Utilização em usinas de incineração, fábricas de cimento e usinas.	As leis polonesas e europeias regulam a possível aplicação de produtos derivados de resíduos materiais.	Utilização convencional (cimenteiras e usinas) exigem condições de alto PCS, bem como baixa umidade, cloro e enxofre. Necessita gasto energético para preparação e aquecimento para produção do combustível, além de uso de pelletizadoras mais robustas devido ao uso de RSU (plástico principalmente).
HLA, San Shwe , ROBERTS, Daniel . Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia. Waste Management	2015	Austrália	Apresentar uma caracterização de resíduos verdes e resíduos sólidos urbanos em termos de química e conteúdo energético.	Biomassa e RSU	Menor disposição em aterros sanitários.	Desenvolvimento e implantação de alternativas, estratégias termoquímicas para gestão de resíduos urbanos.	Redução da disposição de RSU e poluição dos aterros.	Diversidade do material de RSU (poder calorífico, umidade e cinzas).

Trabalho	Ano	País	Objetivo do trabalho	Matérias primas	Ganhos ambientais	Ganhos energéticos	Ganhos sociais	Impactos negativos
IQBAL, M. K.; DEEM, A. and BUTT, M. T. Impact of process parameters on refused derived fuel pellets. Bangladesh J. Sci. Ind. Res.	2020	Paquistão	O objetivo do estudo foi otimizar as condições do processo para o desenvolvimento de pellets de combustível derivado de rejeito (CDR), produzidos a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e biomassa.	RSU e pó de serra	Redução de 20/30% na área dos aterros. Menor emissões de poluentes.	Escassez de energia no Paquistão. Forma inovadora de aproveitamento.	Envolvem benefícios socioeconômicos e ambientais substanciais.	Alta umidade da matéria prima. Gasto com tratamento gases.
MARRUGO, Gloria et al. Pelletizing of Colombian agro-industrial biomasses with crude glycerol. Renewable Energy	2019	Colômbia	Estudar o efeito do glicerol bruto no processo de peletização e na qualidade das pelotas de biomassa.	Bagaço de cana, Casca de Café e Casca de Arroz	Exploração da biomassa em relação a combustíveis fósseis.	Otimização do aproveitamento energético biomassa e glicerol.	–	–
CHYANG, Chien-Song et al. An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal. Waste Management	2010	Taiwan	Foram investigadas as emissões de poluentes de co-combustão de combustível derivado de refugo (RDF) e carvão em um combustor de leito fluidizado de vórtice (VFBC).	CDR	Utilização biomassa em relação aos combustíveis fósseis.	Aproveitamento CDR para geração de energia em co-combustão com carvão mineral.	–	Emissão de PCDD e Cl. Maior emissão de CO.

Fonte: Autor (2021).

Há na literatura trabalhos que analisam a produção de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos sobre diversas perspectivas, desde a influência da geometria, temperatura e pressão de compactação (ZAFARI e KIANMEHR, 2012; GREINERT, MRÓWCZYNSKA e SZEFRNER, 2019., 2019; JEWIARZ et al, 2020; IQBAL, NADEEM e BUTT, 2020), até a avaliação do valor energético do combustível (CHYANG et al, 2010; HLA e ROBERTS, 2015; MARRUGO et al., 2019). Contudo, percebe-se uma escassez de pesquisas relacionadas a aplicação específica para a produção energética na forma de calor para uso industrial. Principalmente aquelas relacionadas ao uso em termoelectricidade, como por exemplo, a partir da co-combustão com carvão mineral. Quando se avalia essa utilização a nível nacional não foram encontradas fontes semelhantes.

Uma lacuna importante observada nessa revisão da literatura é a utilização desses combustíveis como uma ferramenta para a transição energética em relação ao combustível fóssil equivalente, o carvão mineral. E, nesse ponto, destaca-se a possibilidade dessa utilização para o sul de Santa Catarina. Por fim, ainda há de se destacar que a maioria dos estudos foram focados na obtenção do combustível, mas sem direcionamento a uma aplicação final tal como vislumbrado no presente estudo.

2.5 BIOMASSA E ENERGIA

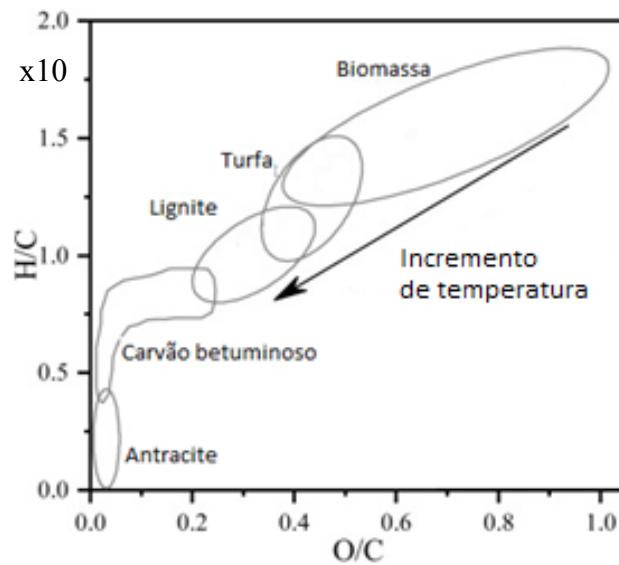
Entre as possibilidades de energia renovável, a energia de biomassa tem a maior utilização, respondendo por 9% do fornecimento total de energia primária no mundo, dos quais 55,4% referem-se ao uso tradicional (cozimento e aquecimento). Estima-se com suposições razoáveis que a biomassa tem o potencial de contribuir muito mais no fornecimento global de energia (MAHAJANI e ARORA, 2018). Além disso, a biomassa é referida como um combustível neutro em carbono porque não há adição líquida de dióxido de carbono na atmosfera na sua aplicação energética, ao contrário dos combustíveis fósseis.

A união europeia define o termo biomassa como a fração biodegradável de produtos, rejeitos e resíduos da agricultura (vegetais e animais), resíduos florestais e das indústrias relacionadas, incluindo a indústria pesqueira e a aquicultura, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e municipais, incluindo também os biofluidos como os óleos vegetais (UE, 2009).

A alta reatividade da biomassa é consequência de suas características físicas e químicas. O conteúdo de voláteis é pelo menos o dobro do carvão. As razões molares H/C e

O/C variam entre 1,3 a 1,5 e 0,5 a 0,6, respectivamente. Esses são valores mais altos do que os encontrados para carvões, que geralmente variam entre 0,8 a 0,9 e 0,1 a 0,3 (WILLIAMS et al, 2012). Uma menor relação implica em mais energia disponível, já que as ligações de C-C possuem mais energia que as ligações C-H ou C-O. Essa relação pode ser verificada no diagrama de Van Krevelen (Figura 4) para diferentes tipos de combustíveis sólidos.

Figura 4: Diagrama de Van Krevelen.



Fonte: Adaptado de Williams et al. (2012).

No Brasil há uma série de resíduos agrícolas que não são gerenciados e aumentam em quantidade a cada ano. O método de queima geralmente é o mais aplicado no local da cultura por causa da facilidade de aplicação para a eliminação, mas torna-se um fator poluente do ar e ocasiona a perda de mineral e água no solo.

Duas matérias-primas interessantes de biomassa na região sul catarinense são as sobras da produção de arroz e as diferentes fontes de derivados de madeira. A escolha prioritária pela utilização de biomassa de arroz (palha e casca) neste estudo ocorre pela vasta área plantada com a cultura no estado, de aproximadamente 150 mil hectares. A casca e a palha de arroz são resíduos agrícolas produzidos após a retirada do arroz do campo. Santa Catarina é o segundo produtor nacional de arroz, com uma produção de 1,25 milhão de toneladas (safra 2020/2021), ficando atrás somente do estado do Rio Grande do Sul (EPAGRI, 2021). A maior produção de arroz em Santa Catarina fica na região sul do estado, com uma área plantada em torno de 90 mil hectares.

A composição química da casca e palha de arroz típica do sul de Santa Catarina é mostrada na Tabela 4, adaptada dos estudos de Miyaki (2011) e Virmond et al. (2012).

Tabela 4: Composição da palha e da casca de arroz da região sul de Santa Catarina.

Biomassa	Casca de arroz²	Palha de arroz¹
<i>Análise imediata</i>		
Cinzas (%)	13,94	12,88
Material volátil (%)	55,87	65,70
Carbono fixo (%)	23,81	13,84
Umidade (%)	6,89	7,58
<i>Análise elementar*</i>		
C (%)	43,40	49,03
H (%)	5,57	6,70
N (%)	0,36	0,89
S (%)	<0,01	0,25
O (%)	50,91	43,01
Cl (%)	0,02	0,11
<i>Poder calorífico</i>		
PCS (MJ.kg⁻¹)	16,50	14,78
PCI (MJ.kg⁻¹)	15,44	13,54

Fonte: Adaptado de 1- Miyaki (2011) e 2- Virmond et al. (2012). *Base seca sem cinzas.

Os indicadores de produção de resíduos agrícolas, podem ser divididos em duas categorias (KLEVESTON, 2011):

- ✓ Indicadores específicos: Apresentam a produção de resíduos por unidade de área plantada da cultura principal;
- ✓ Indicadores relativos: Correlacionam a produção de resíduos com a produção da cultura principal.

Os indicadores relativos aparecem na literatura com uma série de denominações, como SGR (*Straw to Grain Ratio*), índice de colheita, fator de resíduo, índice resíduo-produto, entre outras.

Assim como os indicadores relativos, os indicadores específicos também se apresentam sob uma série de denominações. Estes indicadores são altamente dependentes de fatores como clima, variedade da planta, tratamentos culturais como adubação, solo da região, entre

outros. Para algumas culturas observam-se variações de mais de 50 % nos índices relatados pela literatura (KLEVESTON, 2011).

Nogueira e Lora (2002) apresentaram um indicador de $4,30 \text{ t}_{\text{palha}}/\text{t}_{\text{arroz}}$ em base seca, já Kleveston (2011) apontou um estudo realizado pela empresa Plantar Serviços Agronômicos no ano de 2011, que apresenta uma produção na região sul de Santa Catarina da ordem de $4,8 \text{ t}_{\text{palha}}/\text{ha}$, que equivale a aproximadamente 1 tonelada de palha por tonelada de grão colhido, mesmo valor apontado por Agrimec (2020). Para a casca de arroz os valores encontrados são da ordem de $0,20\text{-}0,27 \text{ t}_{\text{casca}}/\text{t}_{\text{arroz}}$ (NOGUEIRA e LORA, 2002; PERS, 2018), sendo o valor de 20% o mais adotado.

A casca de arroz não possui valor comercial em consequência de sua dureza, fibrosidade e natureza abrasiva e é normalmente usada, diretamente como combustível em caldeiras na própria empresa no qual é beneficiado o arroz (MAIA, 2013). No entanto, uma grande quantidade não é reaproveitada comercialmente, podendo ser comercializada como adubo natural ou descartada como resíduo.

Já a palha de arroz é um material fibroso, obtido dos rejeitos da máquina de coleta do grão de arroz e de parte da planta que não é retirada do solo na colheita (MIYAKI, 2011). Atualmente, ela é utilizada na incorporação do solo, substituindo parte da adubação (Figura 5). O terreno alagado de plantio potencializa a formação do CH_4 , que é mais agressivo do que o CO_2 para o aumento do efeito estufa (MIYAKI, 2011). A palha de arroz não possui alto poder calorífico, a densidade aparente é baixa e a quantidade de álcali e compostos alcalinos é significativa (o que pode ser um complicador nos trocadores de calor). Todas essas características a tornam difícil de manusear, transportar e armazenar de forma eficiente, portanto, limitando sua utilização comercial (KADAM, FORREST e JACOBSON., 2000).

Figura 5: Produção de arroz - etapas. Palha usada para recomposição do solo.

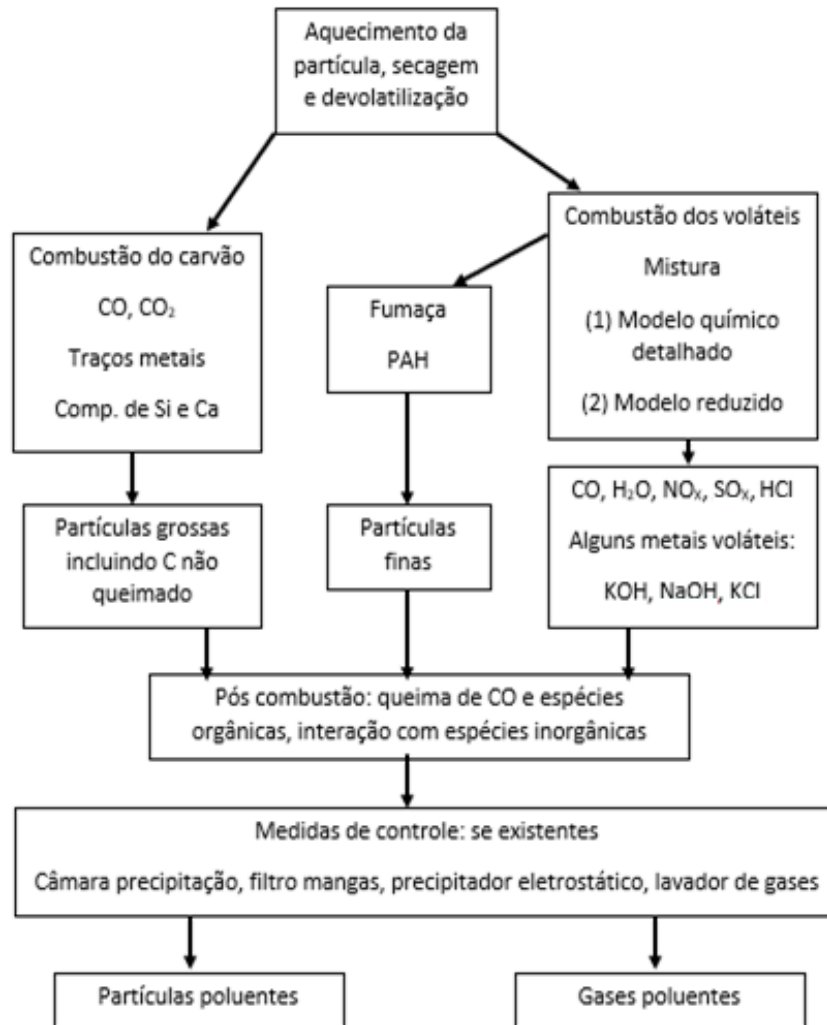


Fonte: Autor (2021).

A combustão da biomassa consiste nas seguintes etapas: aquecimento, secagem, devolatilização (para produzir carvão e voláteis, em que os voláteis consistem em alcatrões e gases), combustão dos voláteis e combustão do carvão (WILLIAMS et al., 2012).

Apesar de ser um componente sustentável, a queima da biomassa produz uma série de emissões, entre as quais cita-se: gás carbônico (CO_2), Óxidos nitrosos (NO_x), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (*polycyclic aromatic hydrocarbons - PAH*). As principais rotas para emissões orgânicas e emissão de fuligem referentes a combustão da biomassa foi apresentada na Figura 6.

Figura 6: Rotas para emissões orgânicas e emissão de fuligem da combustão de biomassa.



Fonte: Adaptado de Williams et al (2012).

Um dos fatores que limitam o uso de certos resíduos agrícolas é o alto teor de umidade, que pode exceder 50% em alguns casos. Esses resíduos requerem secagem ou devem ser misturados com outras matérias-primas (TUMULURU et al. 2010; KAZIMIERZ et al., 2020). No entanto, um processo adicional de secagem de biomassa aumenta significativamente o consumo de energia do processo de produção que, por sua vez, aumenta o custo de produção do combustível. O uso de combustíveis com alto teor de umidade reduz a eficiência energética geral e reduz o desempenho da queima. Esse fator reforça a necessidade de combinação de RSU secos (como plásticos e papel) à biomassa para formulação de combustível de melhor qualidade.

2.6 COMPACTAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Uma alternativa para aplicação dos resíduos é a compactação desses materiais em produtos com maior densidade, como os briquetes ou péletes, convertendo-os em biocombustíveis de alta qualidade. A briquetagem da biomassa é um processo de densificação capaz de produzir um material compacto com maior energia por unidade de volume (TUMULURU et al., 2010; FAIZAL et al., 2016; SRIVASTAVA et al., 2014; AUPRAKUL et al. 2019; REZAEI et al., 2020; SONG et al., 2020). Além disso, a densificação melhora o manuseio e reduz os custos de transporte, produzindo um combustível uniforme, limpo e estável (SING et al., 2012; REZAEI et al., 2020; SONG et al., 2020). O uso de briquetes como combustível em usinas para obtenção de calor ou eletricidade reduz as emissões de partículas por unidade de material queimado e permite a alimentação uniforme em equipamentos industriais tradicionais (MUAZU e STEGEMANN, 2015). Dessa forma, o uso de péletes e briquetes representa uma opção atrativa, com maior densidade e maior dureza para distribuição e manuseio (Figura 7). No entanto há poucos estudos sobre a produção e caracterização desse tipo de combustível em escala piloto (INFIESTA, 2019).

O mecanismo de ligação das partículas durante a aglomeração é atribuído à formação de pontes sólidas que são desenvolvidas durante a compactação por reações químicas e sinterização, endurecimento do aglutinante, solidificação das substâncias fundidas ou cristalização dos materiais dissolvidos (TUMULURU et al., 2011).

Mani, Tabil e Sokhansaj (2002) postularam que existem três estágios durante a densificação da biomassa. Num primeiro estágio, as partículas se reorganizam para formar uma massa compacta onde a maioria das partículas retêm suas propriedades e a energia é dissipada devido ao atrito interpartícula e partícula-parede. No segundo estágio, as partículas são forçadas umas contra as outras e sofrem deformação plástica e elástica, o que aumenta significativamente o contato entre as partículas; as partículas tornam-se ligadas por forças eletrostáticas de Van der Waal. Na terceira fase, uma redução significativa no volume em pressões mais altas resulta no aumento de densidade do compactado. Ao final do terceiro estágio, as partículas deformadas e quebradas não podem mais mudar de posição devido a um número reduzido de cavidades e uma conformidade interpartícula de 70%. É importante entender o processo de densificação e as variáveis que governam seu desempenho, como a combinação de temperatura, pressão e equipamento (TUMULURU et al., 2011).

Figura 7: Compactados de biomassa conformados com a utilização de prensa hidráulica.



Fonte: Tumuluru et al. (2011).

Os requisitos específicos de energia para densificação de biomassa dependem do sistema usado, das variáveis do processo (por exemplo, temperatura e pressão), variáveis de matéria-prima (por exemplo, teor de umidade, tamanho e distribuição de tamanho de partículas) e variáveis de composição bioquímica (por exemplo, presença de amido, proteína, gordura e composição lignocelulósica) (TUMULURU et al., 2011). A maioria dos processos de densificação envolve o trabalho de compressão e extrusão.

Os ligantes melhoram a característica de ligação da biomassa e produzem um produto mais durável. Os aglutinantes também ajudam a reduzir o desgaste no equipamento de produção e aumentar a resistência à abrasão do combustível. Dentro da produção de péletes, ligantes geralmente são permitidos, mas devem ser especificados no produto. A adição de alguns ligantes pode resultar em um aumento no teor de enxofre da biomassa densificada. Os aglutinantes mais comuns usados na produção de péletes são os lignosulfonatos, ou sais de sulfonato, feitos a partir da lignina de polpas de moagem de biomassas (TUMULURU et al., 2011). Além desses, são usados bentonita, amido ou proteínas (TUMULURU et al., 2011; IQBAL, NADEEM e BUTT, 2020).

O processo de compressão pode ser feito mais facilmente com pré-aquecimento. O motivo é que a elevação de temperatura promove uma economia de carga para compactação e amacia o aglutinante natural (como óleo, amido, lignina ou proteína) durante o processo de compactação (AUPRAKUL et al., 2019). No entanto, as partículas podem não obter uma boa ligação a uma temperatura de pré-aquecimento mais alta ou com maior teor de umidade. A razão é que a umidade migra para a parte inferior do material, cujo efeito é o desprendimento

durante o processo de compressão, sendo obtido menor resistência do compactado (AUPRAKUL et al , 2019).

Um trabalho realizado na Índia revelou que uma fábrica de compactação de biomassa com capacidade de 12 t.h⁻¹ gerou Valor Presente Líquido (VPL) positivo quando os preços do compactado tiveram valor acima de USD 100 por tonelada. Os mesmos autores também mencionaram que plantas menores (capacidade de processamento de 2-6 t.h⁻¹) exigiam preços de equilíbrio mais elevados (USD 170 a USD 140 por tonelada) (MAHAJANI, ARORA e PRADHAN, 2018). Ressalta-se que esses valores devem ser enquadrados para a realidade nacional.

Mesmo com todos esses ganhos, há poucos trabalhos de pesquisa relatando essas relações de compactação para péletes de composição mista de biomassa e RSU, com a análise dessas influências sobre a qualidade do produto prensado.

2.7 COMBINAÇÃO DE RSU E BIOMASSA

A combinação de biomassa e resíduos de alto valor calorífico oferece dois benefícios importantes: a maximização do uso dessas fontes de energia e uma solução potencial para o descarte de resíduos plásticos, sendo objeto de alguns estudos nos últimos anos. O desvio de fluxos de resíduos como plásticos, madeiras, papéis e outros resíduos sólidos dos aterros é uma área de crescente interesse, especialmente em áreas densamente povoadas. (ZAFARI e KIANMEHR, 2012; HLA e ROBERTS, 2015; FAIZAL et al., 2016; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; NIDHI et al., 2017; AUPRAKUL, 2019; GREINERT, MRÓWCZYNSKA e SZEFFNER, 2019; JEWIARZ et al., 2020; IQBAL, NADEEM e BUTT, 2020; REZAEI et al., 2020; SONG et al., 2020; SOUZA et al., 2020). Alguns desses assuntos apontam que os compactados obtidos a partir das matérias-primas de RSU e biomassa são altamente densos e com teor de umidade muito baixo (menor que 10%), o que permite alta eficiência de conversão de energia (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015; GREINERT, MRÓWCZYNSKA e SZEFFNER, 2019).

Embora o processo de briquetagem seja uma tecnologia empregada principalmente para compactar biomassa, briquetes feitos de combustível derivado de resíduos, têxteis ou misturas de resíduos de plástico também podem ser produzidos (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; GREINERT,

MRÓWCZYNSKA e SZEFRNER, 2019). A Figura 8 apresenta um briquete produzido por uma mistura de plástico e biomassa, referente aos estudos apresentados por Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015).

Figura 8: Péletes de plástico e biomassa.



Fonte: Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015).

Um dos esforços que estão sendo realizados para resolver (mesmo que de modo parcial) o problema de acúmulo de RSU nos aterros é a recuperação da energia armazenada nesses materiais a partir da obtenção de biocombustíveis (ZAFARI e KIANMEHR, 2012; HLA e ROBERTS, 2015; FAIZAL et al., 2016; GREINERT, MRÓWCZYNSKA e SZEFRNER, 2019; JEWIARZ et al., 2020; IQBAL, NADEEM e BUTT, 2020; REZAEI et al., 2020; SONG et al., 2020; SOUZA et al., 2020).

As operações unitárias comumente aplicadas na produção de biocombustíveis são britagem e trituração, classificação e separação de rejeitos, com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas e separar os materiais que podem ser reciclados (metais ferrosos e não ferrosos) (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015).

As emissões (dioxinas, furanos, mercúrio, cádmio, chumbo, ácido clorídrico, dióxido de enxofre e material particulado) referentes à queima de combustíveis alternativos de resíduos sólidos em testes realizados nos EUA foram menores comparados àquelas de instalações de combustíveis fósseis desde que aplicados os tratamentos adequados para os gases de combustão, como por exemplo: lavador de gases, dessulfurizador, coluna de adsorção, precipitadores eletrostáticos ou filtro de mangas (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015). Além disso, a excelente fluidez, resistência à tração e hidrofobicidade

dos plásticos sugerem que eles são ligantes ideais para a densificação de biomassa (CHEN et al., 2020; SONG et al., 2020).

Produzir misturas de derivados de biomassa (abundante na região sul catarinense) e RSU representa grande potencial em termos ambientais e econômicos comparado à aplicação energética de RSU isoladamente. O teor de cloro total do combustível derivado será menor, o que reduz o risco de problemas de corrosão nos sistemas de conversão térmica, além da redução de emissões atmosféricas de poluentes orgânicos clorados como dioxinas e furanos (MA et al., 2010; GREINERT, MRÓWCZYNSKA e SZEFRNER, 2019). Além disso, o comportamento da conversão termoquímica e o conteúdo energético da mistura de biomassa e RSU pode ser mais bem comparado à biomassa isoladamente, resultando em conversão mais eficiente, tal como observado por Da Silva Filho e colaboradores (2019). Isso foi também observado nos estudos de Boumanchar (2019), Skvaril e Kyprianidis (2019), Jaworski e Malgorzata(2020) e Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020) para a queima de CDR em testes em laboratório ou aplicações em co-combustão industrial.

Para as matérias-primas consideradas neste estudo (RSU e biomassa típica da região) é necessário um estudo de avaliação tanto para o balanço energético, quanto para a viabilidade técnico-econômica levando-se em consideração os sistemas da cadeia de abastecimento local para a demanda necessária. Para a biomassa deve-se também considerar os períodos de entressafra, em que a matéria-prima se torna indisponível para utilização.

Ainda são poucos os trabalhos com o tema combustíveis derivados de RSU e biomassa, especialmente sobre a forma como esses tratamentos influenciam a composição e as propriedades do combustível e, conseqüentemente, seu comportamento na co-combustão. Isso se torna relevante quando relacionamos os trabalhos no Brasil e na região de estudo.

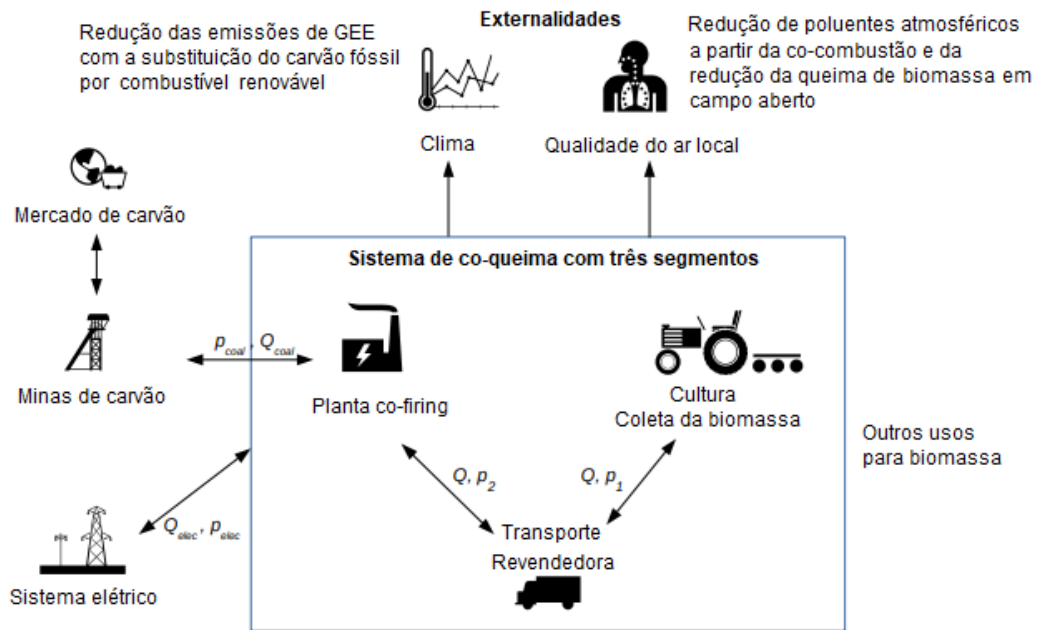
2.8 CO-COMBUSTÃO DE CDR EM UMA USINA A CARVÃO MINERAL

Uma tecnologia promissora para a reciclagem de RSU é a queima de frações de alto teor de energia em formato compactado nas usinas de carvão mineral convencionais.

A co-combustão de biomassa com carvão mineral foi a primeira experiência bem-sucedida com aproveitamento de resíduos sólidos, com mais de 150 usinas em todo o mundo com experiência nesta tecnologia. Essa alternativa está sendo reconhecida como uma proposta

particularmente atraente para a geração de eletricidade, uma vez que fornece um meio imediato e prático de mitigar o uso de carvão com maior rendimento térmico (Figura 9) em relação à instalação de usinas exclusivas a biomassa (menor rendimento à capacidade menor que 100MW) (KOPPEJAN, 2017; MADANAYAKE et al., 2017).

Figura 9: Diagrama do sistema de co-combustão com suas externalidades imediatas.

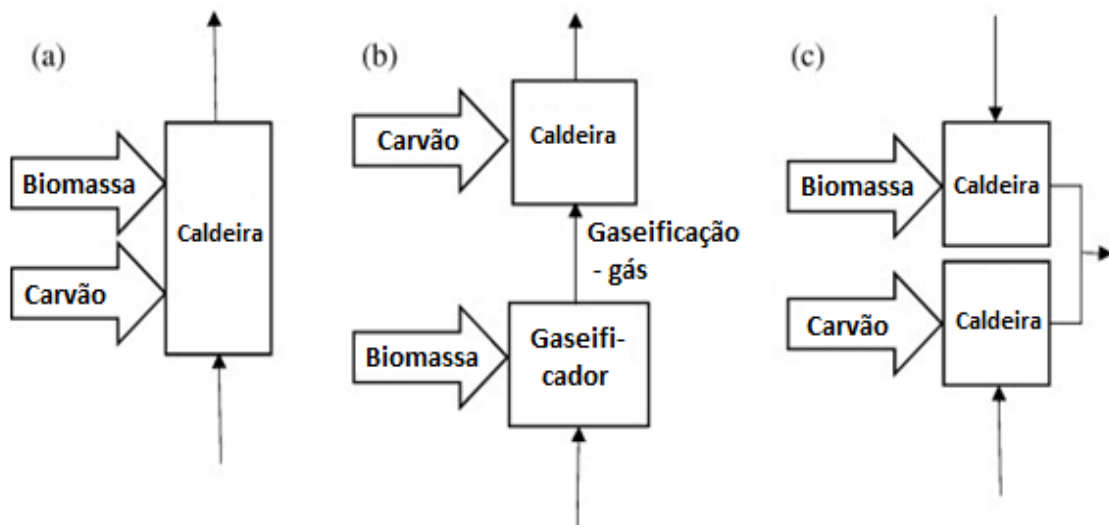


Fonte: Adaptada de Camargo et al. (2020).

Madanayake e colaboradores (2017) apresentam três maneiras de implantar a co-combustão de biomassa e carvão mineral em plantas para geração de energia (Figura 10):

- ✓ Co-combustão direta: utiliza uma única caldeira comum, que pode ser alimentada por queimadores usando uma mistura de carvão e biomassa ou usando queimadores de carvão e biomassa separadamente. Para uma caldeira comum pode-se verificar que as usinas de carvão convencionais podem começar esse processo com modificações mínimas. Portanto, a co-combustão direta é a configuração predominante na indústria de geração de energia;
- ✓ Co-combustão paralelo: têm caldeiras separadas para carvão e biomassa;
- ✓ Co-combustão indireta: depende da gaseificação dos componentes da biomassa. Esse método tem o potencial de utilizar uma alta relação biomassa/carvão e oferece grande flexibilidade de combustível. Problemas decorrentes da combustão da biomassa, como escória, também são evitados. No entanto, a tecnologia é cara e ainda tem pouca implementação.

Figura 10: Diagramas esquemáticos de configurações de co-combustão de carvão e biomassa: (a) direta, (b) indireta, (c) paralela.



Fonte: Adaptado de Madanayake et al. (2017).

Para produzir um biocombustível sólido adequado para co-combustão em caldeiras a carvão, os compactados (de biomassa e RSU) precisam ser desenvolvidos com as seguintes propriedades principais (SONG et al. 2020; THEENERGYST, 2020; MAHAJANI e ARORA, 2018):

- ✓ Densidade de energia comparável ao carvão betuminoso para substituir ou parcialmente substituir o uso de carvão;
- ✓ Alta durabilidade para suportar os danos mecânicos causados durante transporte e manuseio;
- ✓ Impermeável à água de modo a resistir a condições adversas de armazenamento (ou seja, alta umidade e exposição à chuva).

Logo, com o propósito de atender aos requisitos citados, técnicas de compactação, torrefação e lixiviação podem ser aplicadas (MADANAYAKE et al., 2017).

Atualmente, as características da mistura de combustível e da câmara de combustão da caldeira limitam a quantidade de CDR que pode ser queimada. A carga da caldeira é geralmente mantida próxima ou acima de 50% da capacidade nominal antes que o CDR possa ser adicionado para evitar a perda de chama. O calor fornecido pelo CDR é mantido abaixo de 25% do total necessário, sendo um valor de 10% a 15% mais comum (COFIRING RDF WITH COAL FOR ENERGY, _____). Uma vez que a quantidade de biomassa é frequentemente inferior a 20% da carga térmica, as propriedades da chama principal, como temperatura ou velocidade, são amplamente determinadas pelos processos de combustão do carvão mineral (WILLIANS et. al, 2012).

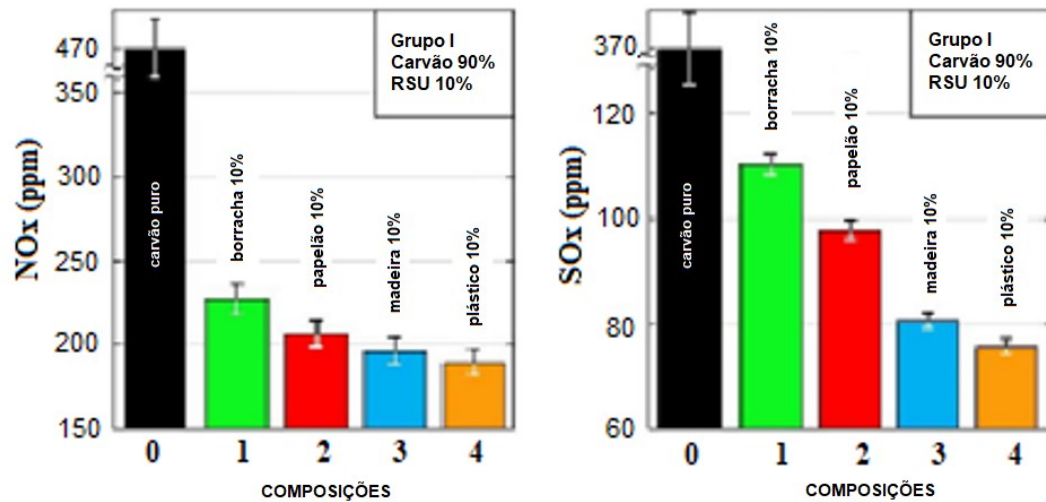
O CDR contém uma fração renovável e pode, portanto, ajudar a reduzir a quantidade de CO₂ fóssil gerado por usinas de carvão. Essa vantagem é em parte mitigada pelo maior teor de cloro e alcalinos nesses combustíveis em comparação com o carvão, o que pode contribuir para problemas de corrosão e deposição de cinzas. Consequentemente, a co-combustão de carvão e CDR deve ser estudada antes de uma utilização em larga escala em usinas de energia (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; LIU et al., 2020).

As concessionárias têm preocupações importantes sobre o uso ou introdução de CDR nas caldeiras existentes. Algumas das preocupações são regulatórias (em relação a liberações ambientais), mas outras estão relacionadas ao desempenho da usina. Como apenas cerca de 10% a 15% da liberação de calor durante a queima normal virá do CDR, a principal preocupação das concessionárias é como o CDR pode interferir nas operações da planta. O potencial para problemas adicionais com escória de cinzas e / ou erosão dos tubos da caldeira é um fator principal nas tomadas de decisões da concessionária (COFIRING RDF WHITH COAL FOR ENERGY, _____; KYPRIANIDIS e SKVARIL, 2016).

Como as emissões de NO_x estão intimamente relacionadas ao ambiente de combustão, é fundamental manter uma taxa de alimentação de sólidos estável e homogênea. No entanto, vários estudos relataram dificuldades em alcançar uma taxa de fluxo de massa constante de CDR para o combustor, que pode ser devido à sua heterogeneidade. Portanto, para utilização em larga escala de CDR, deve-se atentar para a otimização do sistema de alimentação, qualidade e homogeneização do combustível. A produção de CDR homogêneo em termos de tamanho de partícula e composição, com propriedades físicas o mais próximas possível das do carvão injetado é desejável a fim de experimentar o bom funcionamento da caldeira com emissões reduzidas de NO_x (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; GLUSHKOV, D., KUZNETSOV, G. & PAUSHKINA, K. 2020).

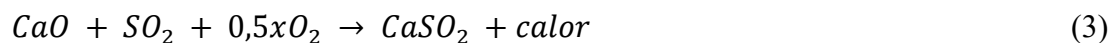
A Figura 11 representa a redução de emissões de NO_x e SO_x para a queima carvão mineral e misturas de resíduos, referenciada nos estudos de Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020).

Figura 11: Emissões de NO_x e SO_x para queima de carvão mineral e misturas de resíduos.



Fonte: Adaptado de Glushkov, Kuznetsov e Paushkina, 2020.

Quer seja um combustor de leito fluidizado, um combustor de ciclone ou um reator de fluxo de arraste, o aumento da taxa de co-combustão de CDR levou a uma diminuição nas emissões de SO₂ (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; JAWORSKI e MALGORZATA, 2020). Duas explicações principais podem ser encontradas para a redução das emissões de SO₂. O primeiro é o teor de enxofre reduzido em comparação com o carvão (WILLIAMS et. al, 2012). O segundo, pode ser explicado por um maior teor de sulfato nas cinzas pesadas e nas cinzas volantes, e pela absorção de SO₂ por óxidos alcalinos na fração mineral (mais precisamente de cálcio). Com o maior teor de cálcio do CDR em comparação com o carvão, um processo de auto retenção de enxofre pode ocorrer de acordo com a seguinte reação geral (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016):



Um exemplo de utilização de CDR em uma caldeira de carvão pulverizado, foi comentado por Kyprianidis e Skvaril (2016), que citou que conforme a alimentação sólida e o gás reagente entram no combustor, as fibras e os plásticos sofrem pirólise endotérmica e protegem os sorventes inorgânicos da exposição à alta temperatura, minimizando assim a sinterização. Nesse nível do reator, o carvão queima e libera SO₂. Quando os fragmentos do CDR atingem as camadas mais altas do combustor e são queimados, os sorventes são liberados e capturam o SO₂ presente no gás de combustão. O uso desse novo combustível levou à redução das emissões de SO₂ em mais de 80% em um leito fluidizado borbulhante, até

85% em um leito fluidizado circulante e até 55% em um ambiente de caldeira de carvão pulverizado. Essas constatações abrem um novo caminho para o CDR, pois pode ser combinado com vários sorventes para o controle das emissões e ajustados para reagir com poluentes de interesse (enxofre, nitrogênio, metais pesados etc.).

Outra preocupação em relação ao CDR é a presença de cloro, que proporciona a formação de dioxinas e de furanos (PCDD e PCDF). O PCDD e o PCDF são componentes quimicamente estáveis, formados em temperaturas em torno de 250 °C a 400 °C (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; LIU et al., 2020). Encontrados durante a combustão de RSU em incineradores dedicados, eles, entretanto, não foram detectados durante a co-combustão de carvão mineral e CDR (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016). Isso pode ser explicado por uma das principais diferenças entre as usinas a carvão e os incineradores de resíduos, que é o nível mais alto de enxofre.

O principal agente de cloração na formação de PCDD e PCDF é o Cl₂, sendo o HCl relativamente ineficaz. Cl₂ pode ser formado por meio de uma reação conhecida como reação Deacon, que pode ocorrer durante o processo de resfriamento de gás (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016):



O Cl₂, no entanto, é decomposto por reação homogênea com SO₂:



Consequentemente, o SO₂ previne a presença de cloro molecular e suprime a formação de PCDD e PCDF. Portanto, concentrações muito baixas (menores do que 0,03 ng/ Nm³) de PCDD e PCDF foram observadas durante a co-combustão de carvão e CDR (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; ZHANG, 2018; BOUMANCHAR, 2019; JAWORSKI e MALGORZATA, 2020).

A qualidade das cinzas produzidas por combustão de carvão pode sofrer alterações se for praticada a co-combustão do carvão com um resíduo. Existem alguns constituintes, tais como os sulfatos, cloretos, magnésio, potássio e o cálcio livre que poderão limitar as aplicações das cinzas para uso em cimenteiras. O teor em matéria não queimada nas cinzas também é um fator limitante na sua aplicação (ABELHA, 2005). Normalmente esse não é um problema apontado (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; ZHANG, 2018; BOUMANCHAR, 2019; JAWORSKI e MALGORZATA, 2020).

Portanto, a co-combustão de carvão e biomassa parece ser uma solução atraente. De fato, a combinação entre o alto teor de carbono do carvão, a alta matéria volátil e o baixo teor de nitrogênio da biomassa permitem uma combustão eficiente e uma minimização das emissões de NO_x , SO_x e CO_2 com um baixo custo (BOUMANCHAR et al., 2019; CHEN et al., 2020a; CAI et al, 2017; JAWORSKI e MALGORZATA, 2020). A co-combustão de combustível derivado de resíduos e carvão permite também que os operadores de usinas sejam flexíveis em relação às variações no fornecimento desse combustível pela possibilidade de uso do combustível original (CHEN et al., 2020a).

Na literatura mundial, observamos um grande interesse do mundo científico e empresarial na pesquisa das possibilidades de substituição do carvão mineral por combustíveis alternativos e renováveis. No entanto, fica claro a falta de dados de experimentos relacionados aos parâmetros da caldeira em escala comercial.

Uma análise financeira em relação a utilização de CDR em usinas a carvão revela bons ganhos nos resultados para todas as opções de queima. Os resultados de estudos sugerem que a utilização de biomassa em geradores de vapor a carvão mineral deve ser considerada por seu potencial de mitigar a geração de gases na produção de eletricidade de maneira econômica e no curto prazo (ZHANG et al. 2010). No entanto, a produção e o uso de combustível compactado de diversas matérias-primas não são totalmente explorados, particularmente em países em desenvolvimento, assunto que requer mais pesquisas e análises.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por objetivo realizar um descritivo das principais etapas de tomada de dados, caracterização das matérias-primas, produção do combustível derivado de RSU e biomassa e caracterização do combustível obtido.

Para a elaboração do planejamento experimental levou-se em consideração a análise do processo de produção de um combustível compactado aplicando-se como base as proporções de preparo descritas nos principais trabalhos referenciados sobre o assunto.

Os fatores aplicados na análise foram o percentual de rejeitos de RSU (frações selecionadas) na amostra e a temperatura de compactação. Embora algumas fontes referenciem a pressão de compactação como fator a ser utilizado, essa variável foi mantida inalterada neste trabalho devido limitações de leitura de pressão no equipamento de compactação montado. O percentual de RSU na mistura foi variado de 0 a 20% em massa, relacionando-se à massa total do compactado. As temperaturas de compactação testadas na conformação dos compactados foram 60 °C, 100 °C e 140 °C.

Para a análise utilizou-se 3 níveis de variação e 2 fatores (3²), o que resultou em um total de 9 experimentos dessa combinação. Dadas as características do processo e dos recursos disponíveis, optou-se pela avaliação desses dois fatores.

A replicação foi utilizada para se manter a estabilidade dos resultados, de forma a se consolidar a base do processo em estudo. Dessa forma, obteve-se o erro experimental em função das réplicas (MONTGOMERY, 2005). Todos os experimentos foram realizados aleatoriamente para reduzir o erro indeterminado (BUTTON, 2012).

As respostas escolhidas para este trabalho foram o conteúdo energético, as características de combustibilidade e a durabilidade dos compactados. Para o conteúdo energético foram elencados o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). Em relação à combustibilidade analisou-se os teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo. Para a durabilidade do combustível compactado verificou-se os requisitos de densidade, resistência à queda, absorção de água e condições de resistência ao intemperismo.

Utilizou-se a análise estatística para fornecer informações valiosas sobre o nível de confiança sobre uma conclusão ou afirmação inicialmente proposta, conforme proposto por Button (2012).

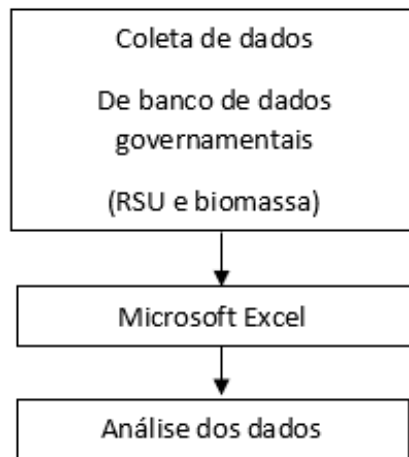
Para interpretação dos dados utilizou-se gráficos de superfície e de barras para representar os fatores em análise em relação às variáveis respostas. Essa avaliação permitiu

que se determinasse a correlação entre os fatores e as variáveis respostas, buscando-se a melhor configuração para maximizar a qualidade do processo (BUTTON, 2012).

3.1 COLETA DE DADOS DE RESÍDUOS DA REGIÃO:

A primeira etapa tratou da coleta de dados de geração de RSU e biomassa da rizicultura na região sul de Santa Catarina, junto aos órgãos públicos de informação. Posteriormente o levantamento foi estruturado com o auxílio do Microsoft Excel (Figura 12). Pode-se verificar a análise dos dados coletados na seção de resultados.

Figura 12: Coleta e análise de dados de geração de resíduos sólidos no sul de Santa Catarina.

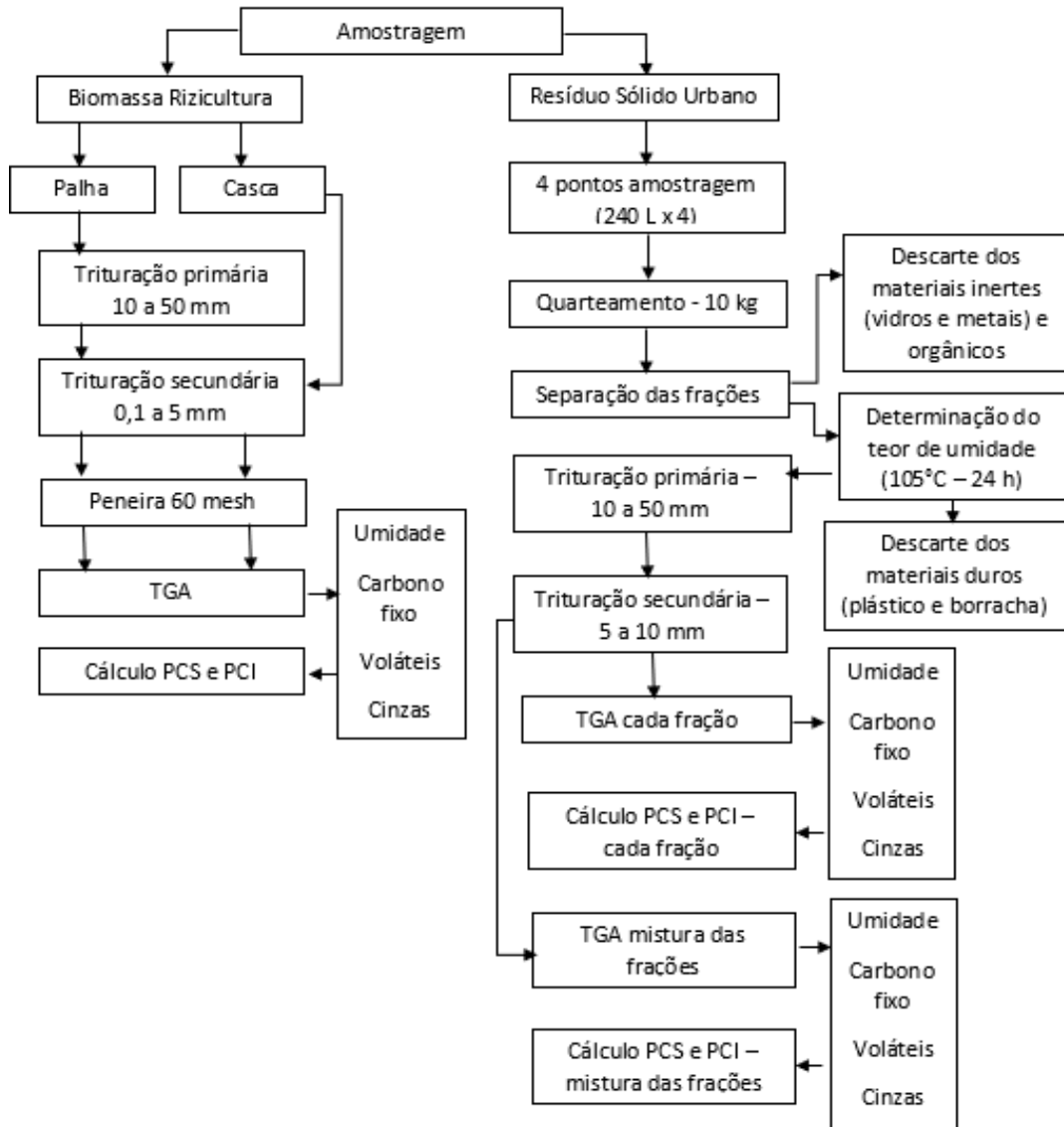


Fonte: Autor (2020).

3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL BASE:

Nesta seção foi descrito o preparo do material base (RSU e biomassa) para a produção do combustível derivado de resíduo, sendo detalhado na Figura 13.

Figura 13: Preparação das matérias primas e caracterização – RSU e biomassa da rizicultura.



Fonte: Autor (2020).

3.2.1 Obtenção dos materiais:

Os resíduos utilizados foram uma mistura de frações selecionadas de materiais não recicláveis de RSU coletadas na etapa de triagem e de biomassa (derivados da produção de arroz), todas obtidas na região sul catarinense, tal como descrito na sequência.

3.2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A composição do RSU é bastante heterogênea e apresenta variação significativa de um local para outro, haja vista a influência de fatores como clima e a cultura local (SOUTO e POVIDELLI, 2013; GOUVEIA, 2012).

Assim, para se ter bom entendimento quanto à qualidade do CDR a ser produzido é de suma importância o conhecimento da composição gravimétrica do RSU, na fração de interesse, neste caso, os rejeitos da coleta seletiva.

Amostras de RSU foram coletadas em um centro de coleta, processamento e reciclagem de RSU do município Imbituba/SC (Figura 14), resultantes da etapa de triagem de materiais recicláveis. De modo a obter-se uma amostra representativa de um ano de operação do empreendimento, foram realizadas três (3) coletas de amostras, em períodos diferentes do ano, que ocorreram respectivamente nas datas 07/04/2021, 24/07/2021 e 06/11/2021. Os materiais utilizados na confecção dos compactados foram resultantes da coleta 1, realizada em abril de 2021, sendo o material das demais coletas utilizadas apenas para determinação da caracterização e teor de umidade, sendo descartadas posteriormente (ou utilizadas em outros estudos).

Para coleta do RSU adotou-se a metodologia utilizada por Soares (2011), que realizou um estudo de caracterização de RSU proveniente de um aterro sanitário, adaptando-se a parcela de quarteamento de duas, para uma parte amostrada (Figuras 15 e 16).

O ponto inicial da metodologia empregada em cada coleta foi escolher quatro pontos de amostragem de RSU, compostos pela retirada de tambores (240 L cada) de material (que seria destinado à área de rejeitos e encaminhado para aterro sanitário). Posteriormente, foi realizado o depósito sobre uma lona plástica, onde realizou-se o quarteamento (separação do material em quatro partes e escolha de uma delas). O total de RSU analisado foi de 960 L em volume. Depois do processo de quarteamento, restou um total de cerca de 10 kg de resíduos, com o qual fez-se novamente o espalhamento para serem separados nas mesmas frações apresentadas no estudo de Soares (2011):

- ✓ Papel / papelão; plástico duro; plástico macio; matéria orgânica (restos de alimentos e folhas de vegetais); borracha; couro; isopor; madeira; trapos; metais; vidro; fraldas; espuma; e outros.

Figura 14: Triagem de RSU centro de coleta, processamento e reciclagem de RSU de Imbituba/SC.



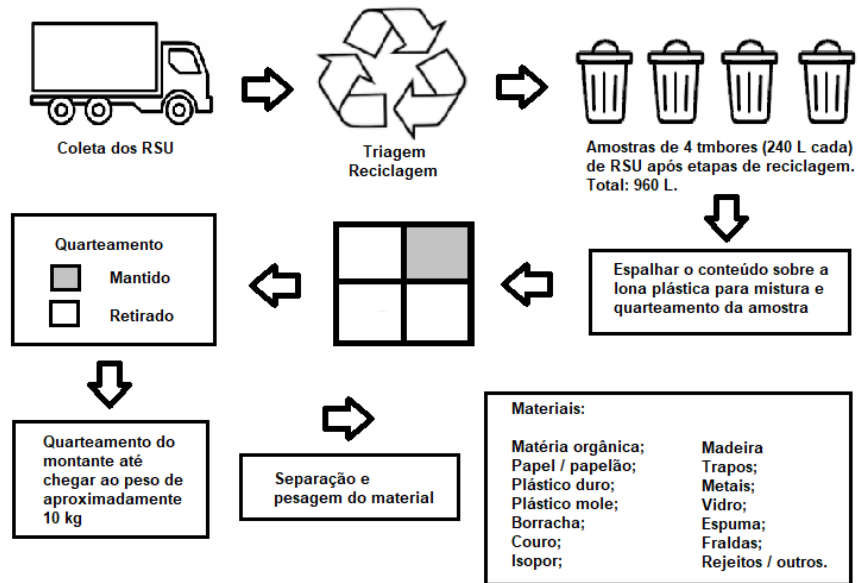
Fonte: Autor (2020).

Depois das frações separadas, foram colocadas em sacos plásticos identificados e a massa de cada uma foi determinada em balança de solo (Marca Exacta/ modelo KA-120), tal como ilustrado na Figura 16. Após isso, foi realizado o cálculo da percentagem de cada material coletado em relação à massa total da amostra.

A preparação das amostras, após secagem, foi realizada triturando os resíduos, por meio de um processador de biomassa marca Trapp - 13,5HP BIO-300, de forma a obter-se um material com granulometria entre 5 e 10 mm.

Na etapa de trituração, foram retirados os materiais inertes (como o alumínio e o vidro) e os materiais de elevada densidade como o couro, borracha e plásticos duros, pois o equipamento utilizado não suporia triturá-los. Esses materiais não triturados foram descartados após a etapa de determinação de umidade das frações .

Figura 15: Amostragem de RSU.



Fonte: Adaptado de Soares (2011).

Figura 16: Etapas de coleta e separação do RSU.



Fonte: Autor (2021).

3.2.1.2 Biomassa da região:

A biomassa, em específico da rizicultura da região sul de Santa Catarina, foi representada por amostras de casca e palha de arroz da espécie *Oryza sativa L.* A casca e a palha de arroz são resíduos agrícolas produzidos após a retirada do arroz do campo. Conforme a ABIB (Associação Brasileira da Indústria de Biomassa), estima-se que a cultura do arroz produza cerca de 200 toneladas de casca para cada 1 mil toneladas de grãos colhidos. Assim, pode-se considerar que o processamento do arroz gera cerca de 20% de resíduos de processamento em forma de cascas (PERS, 2018). Relacionando-se a produção de palha de arroz, pode-se estimar uma relação de 4,8 toneladas de palha, em relação a área (ha) de plantação (KLEVESTON, 2011) ou 1 tonelada por tonelada de grão produzido (AGRIMEC, 2020).

A amostra de casca foi cedida, em saca de 50 kg, pela Cooperativa Agropecuária de Tubarão - COPAGRO, localizada em Tubarão-SC. A amostra foi retirada aleatoriamente após a etapa de descascamento do arroz no processo de beneficiamento industrial e armazenada em local apropriado ao abrigo da luz e umidade.

A palha de arroz foi obtida das plantações de arroz das terras de Jandi Guarezi, no bairro São Cristóvão, na cidade de Tubarão-SC, em fardos de, aproximadamente 20 kg.

A casca de arroz será utilizada *in natura*, sem necessidade de pré-tratamento de secagem. Mesma consideração foi utilizada para a palha de arroz.

A biomassa da rizicultura caracterizada por termogravimetria, foi preparada conforme procedimentos descritos na norma ASTM 7582 (ASTM, 2015).

3.2.2 Secagem, determinação do teor de umidade e trituração das amostras de RSU

A determinação do teor de umidade das amostras foi obtida conforme o procedimento adotado pela norma brasileira NBR 6457/86 (ABNT, 1986) para amostras de solos, adaptando-se para uso em RSU. As amostras foram mantidas em estufa laboratorial com circulação forçada de ar (Marca Solidsteel / Modelo SSDcr 480L) a uma temperatura de 105 °C. Após tempos aproximados de 2h, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas em balança eletrônica de solo (Marca Exacta/ modelo KA-120), com precisão de 0,001 kg) até se observar a constância de massa das amostras.

O teor de umidade foi calculado, sob base úmida, da seguinte forma:

$$\%W_{búmida} = \frac{M_{bu} - M_f}{M_{bu}} \quad (6)$$

Em que $W_{búmida}$ – Teor de umidade em base úmida; M_{bu} – Massa inicial em base úmida; M_f – Massa final (massa do material seco).

A determinação da umidade foi realizada para cada fração dos RSU, obtendo-se uma média para as 3 amostragens realizadas.

3.2.3 Análise imediata das amostras

Os resultados de caracterização imediata para as amostras de biomassa (palha e casca) de arroz da espécie *Oryza sativa L.* cultivada na região de Tubarão / SC, foram determinados com a análise em termogravimetria (TGA). A mesma análise foi utilizada para determinar as principais características de combustibilidade das frações de RSU utilizadas na confecção dos compactados. Foram realizadas as determinações de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. O teor de carbono fixo foi determinado por diferença em relação aos itens anteriores de acordo com a norma ASTM D5142 (ASTM, 2009).

O uso do TGA em escala laboratorial fornece o perfil de perda de massa da amostra e a indicação das temperaturas características para perda de umidade, perda de voláteis, ignição dos voláteis, ignição do carvão e queima do mesmo. Esse método foi desenvolvido inicialmente para carvão, mas têm sido amplamente utilizados para biomassa ou combustíveis derivados (WILLIAMS et al., 2012).

A primeira etapa consistiu na preparação da amostra: homogeneização e retirada de uma massa mínima de 125 g, utilizando-se um quarteador manual; moeu-se até uma granulometria < 0,25 mm, através de moinho de bolas; colocou-se em um frasco plástico, com a etiqueta de identificação.

No aparelho (Figura 17), depois de pesado todas as amostras (cerca de 1 g), iniciou-se a análise. Assim, o primeiro item determinado por aquecimento foi a umidade, utilizando-se uma atmosfera inerte (nitrogênio), até cerca de 105°C. Posteriormente mantendo-se o aquecimento em atmosfera inerte até (aproximadamente) 950°C determinou-se o teor de voláteis. Posteriormente a amostra foi resfriada até cerca de 750 °C e incinerada a essa temperatura, em atmosfera de oxigênio, para determinar-se o parâmetro teor de cinzas. A taxa de aquecimento utilizada foi de 25 °C/minuto, com fluxo de gás inerte (nitrogênio) e oxigênio de 0,5 L.min⁻¹.

Figura 17: LECO TGA-701.



Fonte: Autor (2021).

Foram realizados, no mínimo, quatro ensaios para cada amostra (palha, casca de arroz e amostras de RSU – papel e plásticos), seguindo a norma ASTM 7582 (ASTM, 2015). Os dados utilizados foram a média das amostras, com representação do desvio padrão de cada item analisado.

3.2.4 Análise elementar das amostras

A análise elementar é um método de caracterização importante para determinar o teor de elementos e a qualidade do combustível em comparação ao carvão e a biomassa pura (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015, CHAITANYA et al., 2017). A análise dos elementos principais (conteúdos de C, H, N e O) foi realizada com uso de um forno CHN628 Séries SULFUR LECO Corporation, conforme a norma ASTM D5373-13 (ASTM, 2013). Para determinação do teor de enxofre utilizou-se o mesmo equipamento, aplicando-se a norma ASTM D4239/18 (ASTM, 2018).

O conteúdo de oxigênio é calculado por diferença, utilizando-se a Norma ISO 17247 (ISO, 2005), a qual aplica a seguinte fórmula:

$$O\% = 100 - C\% - Cz\% - H\% - S\% - N\% \quad (7)$$

onde: O= oxigênio; C= carbono; Cz= cinza; H= hidrogênio; S= enxofre; N= nitrogênio; todos em % em massa.

As análises imediatas foram realizadas no laboratório LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão, na SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, em Criciúma – Santa Catarina.

O conteúdo de cloreto também é um fator importante em relação a qualidade do combustível e foi medido usando o método de eletrodos de íons seletivos (Cole-Parmer). As análises foram realizadas no laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, em Jaguaré – São Paulo. Os ensaios foram feitos em duplicata e aplicado o valor médio obtido nas análises.

Devido a restrições, optou-se pela realização de análises elementares somente para as matérias-primas: mistura de biomassa de arroz e mistura de RSU (utilizadas na confecção dos compactados). Essas propriedades para as demais amostras foram calculadas, proporcionalmente às misturas entre elas, considerando-se misturas homogêneas, nas composições de 10% e 20 % de RSU. Lembra-se que idealmente seria a análise individual de cada amostra, contudo pode-se considerar com pequenas margens de erro que os valores obtidos são representativos.

3.2.5 Determinação do poder calorífico das amostras

3.2.5.1 Poder calorífico superior

O poder calorífico é definido como a energia (bruta, líquida ou sob outra condição pré-definida) disponível em uma unidade de massa de um combustível (POLI et al., 2013). Nesses termos, o PCS de combustíveis sólidos pode ser estimado por meio de calorímetro ou através de dados da análise imediata ou elementar.

Utilizando-se a análise imediata, pode-se aplicar as seguintes relações (PARIKH, CHANNIWALA e GHOSAL, 2005; NHUCHHEN e SALAN, 2012; MADANAYAKE et al., 2017):

$$PCS \left(\frac{kcal}{kg} \right) = 84,5104 \times \%CF + 37,2601 \times \%V - 1,8642 \times \%A \quad (8)$$

$$PCS (MJ/kg) = 0,196 \times CF (\% \text{ de massa}) + 14,119 \quad (9)$$

$$PCS (MJ/kg) = 20,7623 - 0,44(V/CF) + 0,0071(V/CF)^2 - 5,2902(CZ/V) + 4,4921(CZ/V)^2 + 0,0143(CF/CZ) \quad (10)$$

sendo: %V o teor de voláteis, %A o teor de cinzas e %CF o teor de carbono fixo.

Em específico, para obter-se os valores de PCS de resíduos sólidos urbanos (RSU), utilizou-se a equação apresentada por Poli et al. (2013), com base na análise elementar, aplicando-se a equação de Dulong modificada.:

$$PCS = 7831 \times C_{org} + 35932 \times (H - O/8) + 2212 \times S - 3545 \times C_{inorg} + 1187 \times O + 578 \times N \quad (11)$$

onde, PCS (base seca): Poder Calorífico Superior dos RSU (kcal/kg); C_{org} : % em massa de Carbono orgânico; C_{inorg} : % em massa de Carbono inorgânico; H: % em massa de Hidrogênio; O: % em massa de Oxigênio; S: % em massa de Enxofre; N: % em massa de Nitrogênio; todos em base seca.

A parcela referente ao carbono inorgânico não participa da combustão, portanto, se incorpora as cinzas. Isso porque esta fração é correspondente ao carbono mineralizado, principalmente na forma de carbonatos. Esta fração situa-se entre 0,8 e 1%, logo possui pouca influência, sendo de cerca de 32 kcal de um total de 3.500 kcal. “Portanto, ainda que esse parâmetro não tenha sido ensaiado, a parcela de $3545 \times C_{inorg}$ será considerada igual a 32 cal” (POLI et al., 2013).

Para a fração biomassa, após determinadas as frações elementares, pode-se calcular o poder calorífico superior (PCS) por meio das correlações propostas por Ozyuguran et al. (2018):

$$PCS = -4,9140 + 0,2611xN + 0,4114xC + 0,6114xH + 0,3888xS + 0,02097xO \quad (12)$$

onde, PCS base seca: Poder Calorífico Superior da biomassa (MJ/kg); C: % em massa de carbono orgânico; H: % em massa de Hidrogênio; O: % em massa de Oxigênio; S: % em massa de Enxofre; N: % em massa de Nitrogênio; todos em base seca.

Uma outra forma de obter-se o PCS é utilizando-se o calorímetro. Para este estudo esses dados foram obtidos utilizando-se a norma ASTM D5865-13 (ASTM, 2013b),

aplicando-se o CALORÍMETRO – MODELO AC 500, da LECO Corporation. Foi utilizado uma média de duas leituras de amostras para obter os resultados da análise.

3.2.5.2 Poder calorífico inferior

O Poder Calorífico Inferior - PCI é a energia líquida a ser obtida do combustível e pode ser estimado a partir do Poder Calorífico Superior – PCS, entalpia de vaporização da água e o teor de umidade do material de interesse. Utilizou-se a equação apresentada por Virmond et al. (2012), onde o PCI pode ser calculado pela Equação de Dulong:

$$PCI = PCS - 2,43 (9H + U) \quad (13)$$

onde o PCS e o PCI são dados em MJ.kg^{-1} , H fração de massa do Hidrogênio na amostra determinada por meio de análise e U corresponde ao teor de umidade da amostra.

3.2.6 Preparação do material a ser prensado

Nos diversos estudos verificados sobre o assunto, observa-se que os materiais de base do CDR provêm de um fluxo de resíduos sólidos pré-classificados.

O material oriundo do RSU, pré-classificado, continham como elementos principais: papel, papelão, materiais de fibra e material plástico (principalmente PET, HDPE, PP e PS expandido (ou isopor)). As parcelas utilizadas, em massa, no total utilizado de RSU para a preparação dos compactados foram representadas por :

- ✓ Papel/papelão – 78,6%;
- ✓ Plástico mole – 18,4%;
- ✓ Isopor – 3,0%.

O percentual escolhido corresponde à massa encontrada na primeira amostra de rejeitos de RSU coletada, sendo esses os materiais possíveis de serem processados em laboratório com as ferramentas disponíveis.

A biomassa para confecção das amostras teve uma composição, em massa, que representa proporcionalmente a produção desses resíduos na região, conforme informações dos trabalhos de Kleveston (2011), Nogueira e Lora (2002) e PERS (2018):

- ✓ Casca de arroz – 15,0%;
- ✓ Palha de arroz – 85,0%.

Para a utilização neste estudo adotou-se granulometria para o RSU de 5-10 mm e para a biomassa de 0,1-5 mm (Figura 18). Como base adotou-se os estudos de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015), Garrido, Conesa e Garcia (2020) e Song et al. (2020), onde os preparos, nas diferentes composições para obtenção de combustível compactado, necessitaram da trituração nos tamanhos de partícula de 4-8 mm.

Figura 18: Características dos materiais utilizados para produção dos combustíveis.



Fonte: Autor (2021).

Para obter a granulometria desejada, antes da compactação, foi necessária uma segunda etapa de trituração. Para essa etapa utilizou-se um liquidificador doméstico marca Philco, modelo PLQ912 e de potência igual a 1200 W. O equipamento foi utilizado para obter-se a granulometria desejada nas frações utilizadas (Figura 19). Um processo de peneiramento em malha 10 mesh foi realizado para a preparação da fração biomassa (casca e palha de arroz).

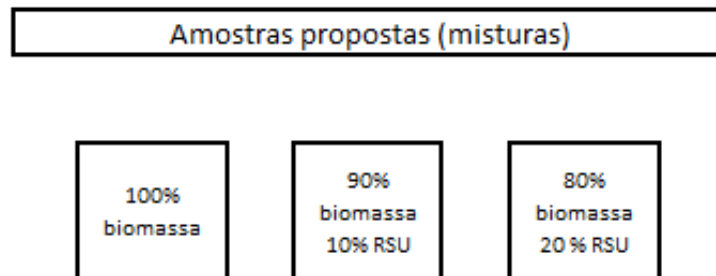
Figura 19: Componentes utilizados na preparação dos compactados (papel/papelão; plástico mole; isopor e biomassa - casca e palha de arroz).



Fonte: Autor (2021).

As misturas propostas para a formação dos compactados foram ilustradas na Figura 20, utilizando o percentual de RSU na mistura com biomassa dentro da faixa aplicada nos estudos de Faizal et al. (2016), Garrido, Conesa e Garcia (2017) e Gonçalves (2010).

Figura 20: Misturas empregadas na obtenção dos combustíveis derivados de RSU e biomassa compactados.



Fonte: Autor (2021).

A amostra base é representada pela composição exclusiva de biomassa (palha e casca de arroz nos percentuais apresentados). As amostras com adição de 10% e 20% de RSU tem como objetivo verificar os efeitos sinérgicos destes componentes à biomassa base.

Como forma de identificar as amostras testadas, ao longo do trabalho será apresentada uma codificação simples, do tipo: “000°C/00%RSU”. A primeira parte indica a temperatura de conformação (000°C) e a segunda o percentual de RSU na mistura (00%RSU).

Para cada mistura proposta utilizou-se uma massa total de 2,5 g, que foi pesada individualmente (Figura 21) levando-se em consideração os percentuais de biomassa e RSU informados. Para a biomassa utilizou-se uma balança digital marca SHIMADZU, com

precisão de 0,01 g. O RSU foi pesado em balança marca KATASHI, com (melhor) precisão de 0,001 g. Cada mistura foi homogeneizada em embalagens individuais antes do processo de compactação.

Figura 21: Misturas preparadas para conformação dos compactados (0, 10% e 20% de RSU).



Fonte: Autor (2021).

Deve-se verificar com cuidado o teor de umidade, porque esse item representa um importante item para uma maior eficiência energética. O ideal é ter-se um reduzido teor de umidade, porém, é necessária uma umidade mínima para auxiliar no processo de compactação. O teor de umidade ideal para compactação apontado por Moraes et al. (2006) e Gonçalves (2010) é de 10% a 15%. De forma a garantir uma umidade mínima exigida, um total de 10% (0,25 ml) de água foi adicionado às misturas antes do processo de aquecimento e compactação.

3.3 PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO COMPACTADO

Com as amostras de material prontas, iniciou-se a conformação sob pressão. Para isso, utilizou-se uma prensa hidráulica, desenvolvida como parte da pesquisa, conforme modelo descrito no trabalho de Falemara et al. (2018) e um molde para conformação - ilustrados na Figura 22.

Figura 22: Prensa produzida para o estudo com medição de pressão aplicada (célula de carga) a esquerda. À direita, molde projetado para compactação.



Fonte: Autor (2021).

Para a montagem da prensa utilizou-se tubos retangulares de aço carbono (30 x 50 mm), molas de aço galvanizado e um macaco hidráulico de garrafa, com capacidade nominal de 4 toneladas (marca Bovenau e modelo CJ-4700). A montagem foi projetada conforme desenho em anexo (Anexo G), sendo as soldas realizadas com eletrodo de Metalon (Cifarelli 6013 2,50mm).

Neste trabalho utilizou-se três temperaturas (60 °C, 100 °C e 140 °C), enquadradas entre os limites apresentados nos trabalhos de Razaei et al. (2020), Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015), Faizal et al. (2016) e Song et al. (2020). Além desses, compactou-se também alguns itens na temperatura ambiente (26 °C), sem processo de aquecimento, para comparação.

Para o aquecimento dos componentes (Figura 23) foi aplicado uma estufa laboratorial (Marca Solidsteel / Modelo SSDcr 480L). A temperatura das misturas dentro do molde (na estufa), foi monitorada com auxílio de um termopar tipo “J” acoplado e um indicador NOVUS (modelo N1500) calibrado (conforme ficha de calibração em anexo – Anexo A).

Figura 23: Dispositivo para medição de temperatura da amostra e estufa utilizada.



Fonte: Autor (2021).

O material pesado foi pré-condicionado no interior do molde cilíndrico, montado em aço SAE 1045, conforme projeto realizado (anexo I), com 90 mm de altura e 17,5 mm de diâmetro interno. Um termopar foi inserido no interior da mistura (parte central), para determinação mais precisa da temperatura da amostra. Ao ser atingida a temperatura desejada (± 5 °C), o molde foi retirado da estufa com auxílio de uma pinça e luvas, sendo posicionado na prensa para o processo de conformação sob pressão.

A pressão de compactação normalmente adotada é de 1-150 Mpa para a grande parte dos trabalhos pesquisados (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2014; FAIZAL et al., 2016; GARRIDO, CONESA e GARCIA, 2017; AUPRAKUL et al. GREINERT et al., 2019). Logo, optou-se por adotar um valor próximo a 50 Mpa, como um valor intermediário, apropriado para essa aplicação.

Para verificação da capacidade da prensa hidráulica utilizou-se uma célula de carga (Capacidade 4,5 ton; Leitura 500kg e Precisão $\pm 2\%$) modelo LH50 - Série LH da Enerpac. A força aplicada foi lida como 1.150 kgf. Como a área do molde é de 2,4 cm², obteve-se uma pressão aplicada de 46,9 Mpa (máxima obtida), que foi a adotada para todas as bateladas de compactação das amostras.

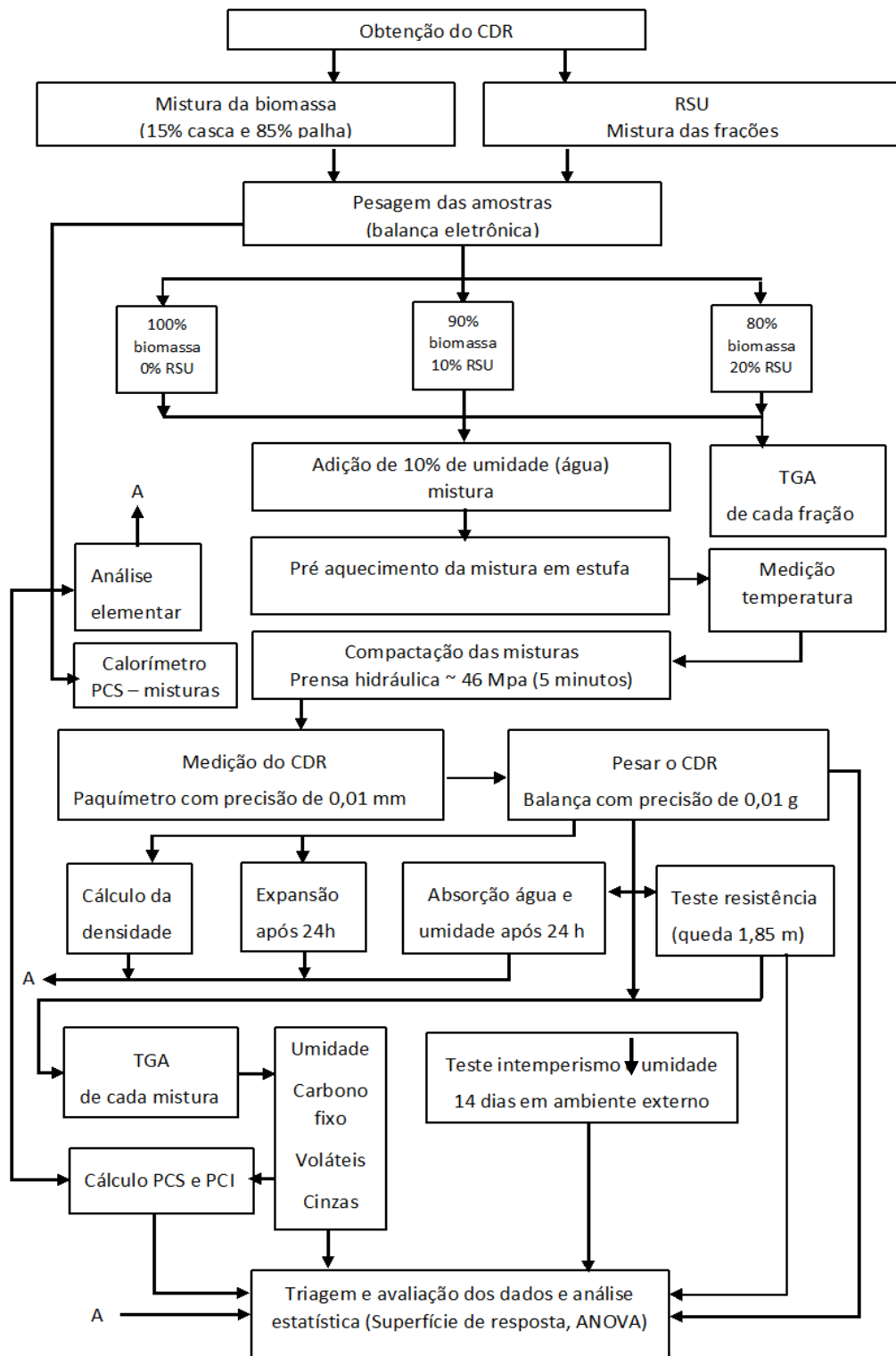
O material foi pressionado por cerca de 5 minutos, conforme média de tempo adotado em alguns dos trabalhos pesquisados, como Gug, Cacciola e Sobkoicz (2015), Pradhan et al. (2018) e Song et al. (2020).

3.4 MÉTODOS DE TESTE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RSU E BIOMASSA COMPACTADO

Neste item estão descritos os métodos de teste que foram utilizados para analisar os combustíveis derivados de RSU e biomassa conformados. Os testes foram utilizados para validar a qualidade do material em termos de absorção de umidade, qualidade de transporte (rigidez), quantidade de energia e combustibilidade (Figura 24). O processo de conformação se procedeu sem variação no teor de umidade e pressão, de forma que esses itens não influenciassem os resultados das análises.

A qualidade do produto obtido na etapa de compactação foi avaliada em termos de composição físico-químicas e aspectos mecânicos (análise imediata e elementar, poder calorífico, diâmetro, comprimento, resistência mecânica, densidade aparente e densidade energética), tomando-se como base Embrapa (2012), Faizal et al. (2016), Garrido, Conesa e Garcia (2017) e Gug, Cacciola e Sobkowitz (2015). Esses resultados foram utilizados para identificar as melhores composições e estimar o potencial de uso do combustível na produção de calor a partir da combustão, como realizado por Rossi (2014).

Figura 24: Preparação do combustível compactado e caracterização.



Fonte: Autor (2021).

3.4.1 Teste mecânico de durabilidade

A durabilidade mecânica é um parâmetro crucial para analisar-se as condições de transporte e logística para o combustível. Para grande parte dos trabalhos pesquisados, a resistência dos materiais compactados foi determinada por meio de uma técnica de falha, com aparecimento de fenda, realizado com uma máquina no modo de compressão (CACCIOLA e at., 2015; FAIZAL et al., 2016). Para Sing et al. (2012) os testes em compactados de biomassa foram obtidos das análises de trincas e perda de material, onde as amostras de briquetes caíam livremente de uma altura pré-determinada.

Para este estudo o teste mecânico de durabilidade foi realizado conforme metodologia de Sing et al. (2012), soltando o material compactado de uma altura de 1,85 m em uma placa de aço plana por quatro vezes. Calculou-se a durabilidade (%) como a razão entre a massa final do material pós quatro quedas e a massa inicial do briquete, conforme mostrado na equação:

$$Durabilidade = 1 - \left(\frac{\text{Massa do material após 4 quedas}}{\text{Peso inicial do material}} \right) \times 100 \quad (14)$$

Após as quedas, os compactados com perda de massa maiores que 10% (resistência menor que 90%) foram avaliados como “falhos” e os compactados com perdas menores que a informada, avaliados como “aprovados”.

3.4.2 Densidade do compactado

Neste trabalho, realizou-se a determinação da densidade seguindo um método estereométrico, conforme descrito por Rabier et al. (2006). As dimensões, diâmetro e altura do briquete, foram medidos usando um paquímetro com precisão de 0,01 mm, enquanto a massa do compactado foi obtida através de uma balança marca SHIMADZU, com precisão de 0,01 g.

$$D = M / V \quad (15)$$

onde: M é a massa do combustível compactado e V é o volume calculado através das medidas obtidas após 24 horas do processo de compactação.

Conforme estudo de Jewiarz et al, (2020), um outro item importante a ser considerado para todas as amostras, é após um período de 24 h, determinar o fator R de relaxamento (expansão), que é uma característica de uma grande quantidade de compactados de biomassa. Ele fornece informações sobre as mudanças de altura após 24 h, pois é normal que os grânulos de biomassa se expandam após a densificação. É dado por:

$$R = (h_{24} - h_0) / h_0 \quad (16)$$

onde R é o coeficiente de expansão, h_0 é a altura do compactado imediatamente após o processo de produção, e h_{24} é a altura do material após 24 h.

Esta quantidade fornece informações sobre a força de ligação entre as partículas. Para materiais elásticos, R terá valores maiores que para materiais rígidos.

3.4.3 Teste de absorção de água

O teste de absorção de água é usado para verificar a estabilidade dos compactados com relação a exposição à umidade e foi realizado conforme metodologia usada por Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015). Esse teste é importante para avaliar a qualidade do combustível quanto à resistência mecânica quando úmidos.

Realizou-se o procedimento mergulhando os compactados em recipientes com água à temperatura ambiente. Primeiramente os compactados secos foram pesados usando uma balança eletrônica (marca SHIMADZU, com precisão de 0,01 g) e depois colocados em banho. Após tempos pré-determinados, de até 60 minutos, os briquetes foram retirados e secos em papel absorvente antes da pesagem. O teste foi repetido até que os corpos-de-prova tivessem o conteúdo de absorção de água em equilíbrio, sendo os resultados usados para calcular o conteúdo de água na amostra. Ao final, os compactados foram colocados em atmosfera ambiente para verificar a umidade de equilíbrio após 48 horas.

O teor de umidade adquirido foi calculado aplicando-se o seguinte cálculo:

$$W_U(\%) = \frac{W_t - W_i}{W_t} \times 100 \quad (17)$$

onde W_u é o conteúdo de água na amostra, W_t é a massa úmida da amostra no tempo t e W_i é a massa inicial da amostra antes de colocar na água.

Outro ponto testado foi a colocação de compactados recobertos por glicerol (0,50 + 5 g de cobertura) nas mesmas condições anteriormente apresentadas, para verificar a influência na absorção de umidade. As características do glicerol utilizado são apresentadas no Anexo S.

Realizou-se testes em duas amostras para cada condição (teor de RSU e temperatura de conformação) e obteve-se o valor médio, com desvios-padrão representando o erro experimental (Anexo L).

3.4.4 Teste de intemperismo e umidade

O teste de exposição ao tempo foi realizado conforme procedimento utilizado por Song et al. (2020), colocando o material em condições externas, sem qualquer cobertura. Para evitar o acúmulo de água da chuva, utilizou-se um recipiente com base porosa para conter os compactados durante todo o teste. O período de exposição das amostras foi de 14 dias, sendo anotadas as condições meteorológicas de forma detalhada (Anexo C). Após a exposição às condições atmosféricas, o aumento da espessura do briquete (Δh , também denominado resistência à umidade) e de massa (R_m) foram calculados seguindo as equações (18) e (19), para indicar as mudanças nos compactados após os testes de intemperismo.

$$\Delta_h = \frac{h_i - h_0}{h_0} \times 100 \% \quad (18)$$

$$R_m = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \% \quad (19)$$

onde: h_0 e h_i representam a espessura dos briquetes antes e depois dos testes; m_0 e m_i representam a massa dos briquetes antes e depois dos testes.

Testaram-se 2 amostras de compactado preparadas em cada condição (percentual de RSU na mistura e temperatura de compactação).

3.4.5 Análise estatística

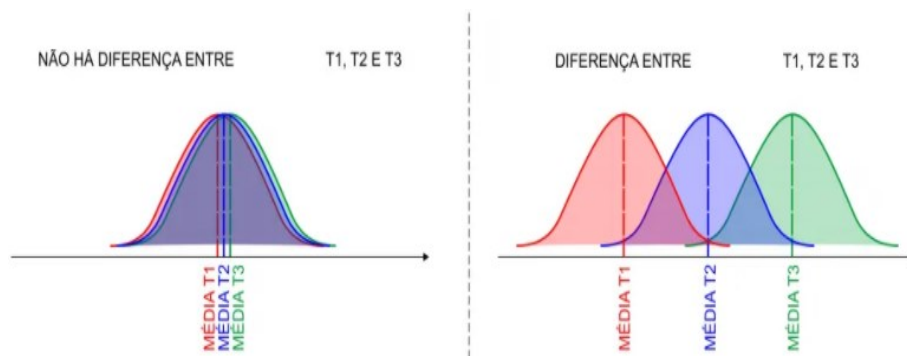
Para auxílio na análise dos resultados utilizou-se de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões pudessem ser objetivas. Destaque-se que esses métodos não permitem afirmar se uma dada variável apresenta ou não um determinado efeito, eles apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido (BUTTON, 2012).

Song et al. (2020) e Rezaei et al. (2020) incluíram os dados (de perda de massa durante os testes durabilidade, conteúdo de plástico e papel, mudanças na espessura e teor de umidade das amostras) para serem analisados por meio de análise de variância unilateral (ANOVA).

O uso da estatística para avaliar o desempenho dos produtos através da análise de variância ANOVA permite a representação dos graus de influência dos fatores com relação à propriedade que está sendo avaliada (Figura 25). A partir do conjunto de dados, ao executar-se a análise de variância (ANOVA) sobre os arranjos propostos, obtém-se os valores dos fatores de controle que otimizam o processo. A ANOVA consiste em uma técnica estatística que decompõe origens que justificam a variação total. Na metodologia utilizada se reduz a variação total dos valores observados de forma individual em torno da média (BUTTON, 2012).

A ANOVA foi utilizada neste estudo para verificar a influência da quantidade de RSU e da temperatura de compactação em termos de durabilidade, expansão, densidade e absorção de umidade das misturas. De forma complementar é aplicado o teste Tukey, quando o fator “F” para tratamentos da ANOVA for significativo.

Figura 25: Representação gráfica da ANOVA.



Fonte: OPER, 2021.

3.4.6 Estimativa da geração de energia elétrica a partir de RSU e biomassa

Uma opção de utilização do combustível produzido é a aplicação em caldeiras para produção de energia elétrica. Pode-se considerar as termelétricas instaladas na região em estudo para esta análise.

Para obtenção da quantidade de energia elétrica produzida com a energia do combustível, leva-se em consideração o fator de capacidade (tempo em funcionamento do equipamento) e a eficiência de conversão da usina (normalmente de 25 a 35%) (HANSAN e AHSANT, 2015).

Uma forma de calcular o potencial de produção de energia elétrica é a aplicação da fórmula abaixo (HANSAN e AHSANT, 2015):

$$E = \frac{PCI_{resíduo} \cdot M_{Resíduos} \cdot \eta_{Usina} \cdot FC_{Usina}}{8760} \quad [MWh] \quad (20)$$

onde: PCI é a energia do resíduo (MW/t); M a massa de resíduo obtida em um ano (t); η é o rendimento da usina (%); FC é o fator de capacidade da usina (tempo de funcionamento) (%); 8760 é o total de horas do ano (h).

3.4.7 Custos operacionais para co-combustão de carvão com combustíveis de RSU e biomassa (CDR)

Para implantação de um sistema para utilização de CDR em usinas a carvão, deve-se analisar, entre outros itens os custos operacionais. Os custos operacionais envolvem o custo da eletricidade consumida para o sistema de preparação de combustível e o novo sistema de operação da planta. Esses foram calculados com base no preço médio da eletricidade e seu consumo por unidade de combustível pronto para ser queimado na caldeira (GLUSHKOV, KUZNETSOV e PAUSHKINA, 2020):

$$EE = C_{eletricidade} \times G_{eletricidade} \times B_{combustível} \quad (21)$$

onde: $C_{\text{electricidade}}$ é o custo da eletricidade, USD/kWh; $G_{\text{electricidade}}$ é a energia consumida para a preparação de combustível, kWh/ t; $B_{\text{combustível}}$ é a quantidade de combustível queimado na caldeira, t.

4 RESULTADOS

Apresenta-se nesta seção os principais resultados obtidos das pesquisas e experimentos realizados tanto na obtenção do material base (RSU e biomassa) como na produção do combustível compactado.

A primeira etapa de resultados trata das análises dos dados de geração de RSU e biomassa da rizicultura na região sul de Santa Catarina, para compreensão dos números envolvidos e ter-se uma estimativa de matéria prima para produção do combustível compactado, assim como verificar os pontos de concentração desses resíduos.

Quanto à caracterização dos materiais que farão parte do combustível compactado, obteve-se a densidade energética desses componentes como principal informação. De forma complementar, verificou-se a quantidade de cinzas (como elemento inerte e que tem influências na formação de acúmulo nos trocadores de calor), de voláteis (com influência na estabilidade da combustão) e a análise elementar, incluindo o cloro (que é um fator determinante para uso em caldeiras industriais).

Posteriormente, obteve-se as características do combustível compactado, em especial a durabilidade, poder calorífico, combustibilidade e higroscopicidade. Com essas informações foi possível verificar o potencial do novo combustível como substituição aos combustíveis fósseis para usos industriais, com foco na utilização em termelétricas da região.

4.1 RESÍDUOS GERADOS NA REGIÃO DE ESTUDO

A pesquisa de campo possibilitou a obtenção do quantitativo dos principais resíduos sólidos produzidos na região, assim como determinar os pontos de concentração desses materiais, no sul do estado de Santa Catarina.

Como fonte principal de pesquisa foi utilizado o SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. O SNIS se constitui no maior e mais importante sistema de informações do setor saneamento no Brasil, apoiando-se em um banco de dados que contém informações de caráter institucional, administrativo, operacional, gerencial, econômico-financeiro, contábil e de qualidade sobre a prestação de serviços de água, de esgotos e de manejo de resíduos sólidos urbanos (SNIS, 2021). As informações do SNIS são coletadas anualmente e provêm de prestadores de serviços ou órgãos municipais encarregados da gestão

dos serviços, sendo a base de dados totalmente pública e disponibilizada gratuitamente no sítio www.snis.gov.br.

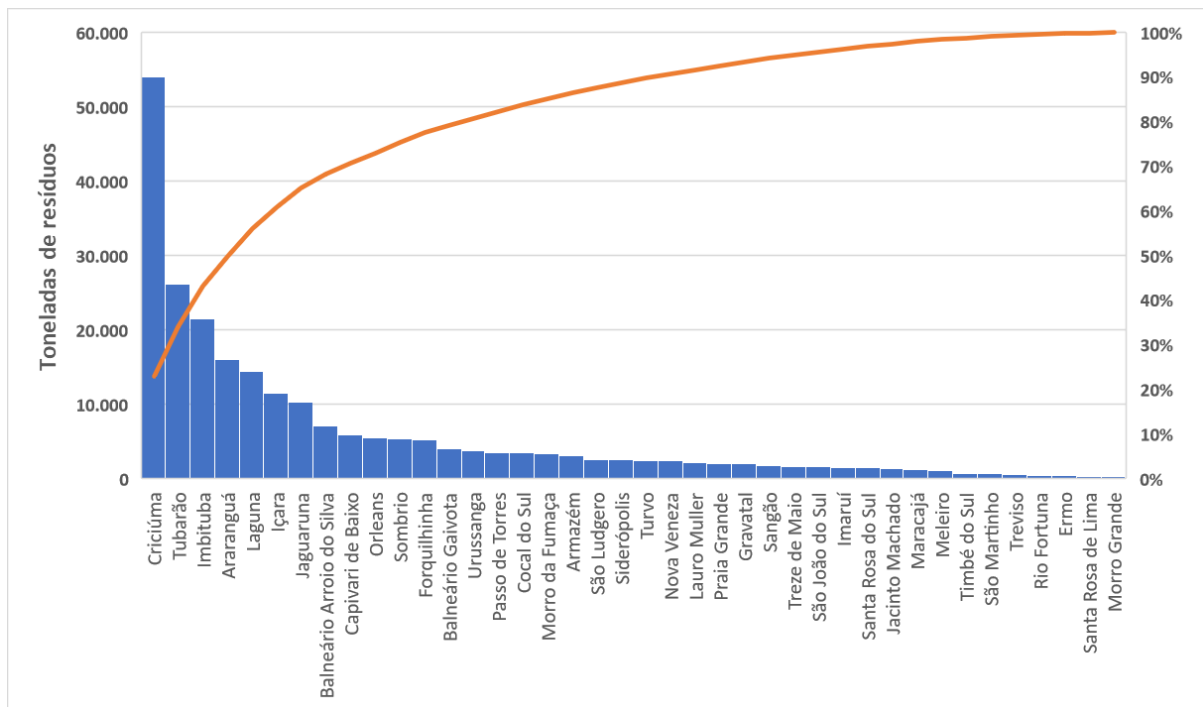
O volume total de resíduos é composto pelas parcelas de resíduos públicos (RPU) provenientes da varrição ou limpeza de logradouros públicos e pelos resíduos domiciliares (RDO).

A avaliação dos dados coletados foi organizada por cidades em ordem crescente de produção de resíduos na região sul de Santa Catarina (Figuras 26). Percebe-se que mais de 50% dos resíduos produzidos estão concentrados em apenas cinco cidades da região.

Outra análise realizada foi a distribuição dos municípios pela produção de resíduos *per capita* urbana (figura 27). Acredita-se que as variações obtidas em relação a produção total de resíduos são resultado da cultura local, distribuição da população no município, vocação turística, entre outras possibilidades.

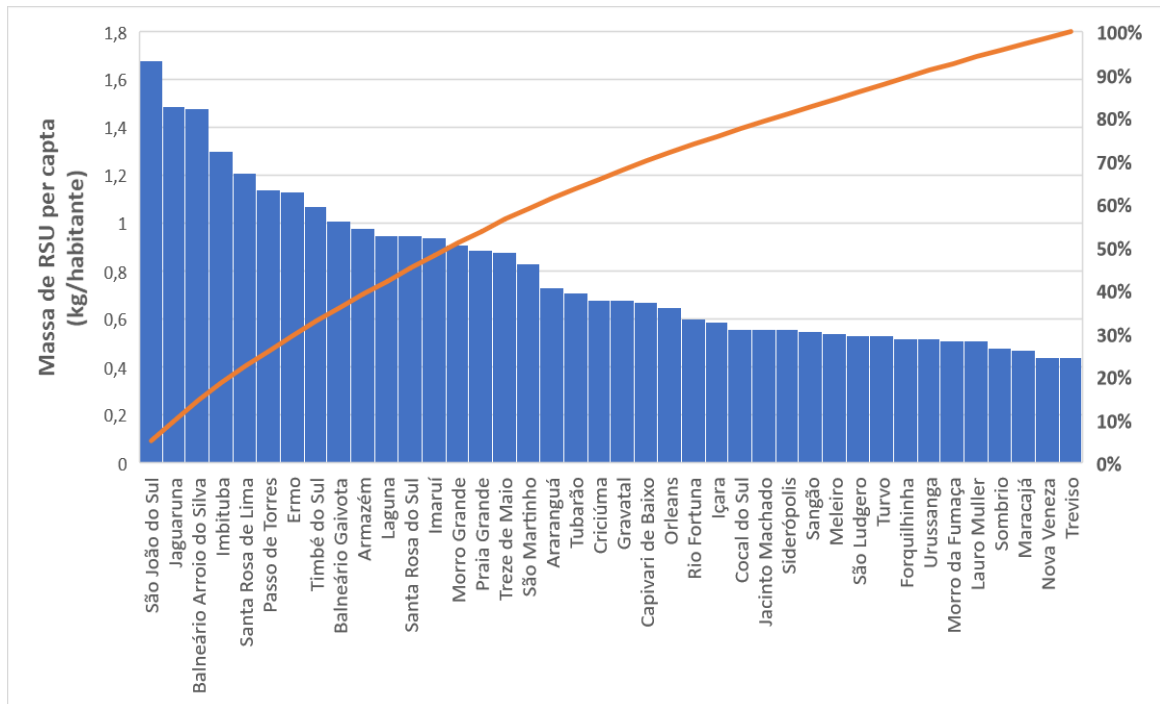
O ano base analisado foi o de 2020, com base em uma análise prévia dos dados, como sendo o ano com dados mais recentes e mais completos disponíveis na plataforma de consulta em relação aos municípios em estudo. O total de RSU produzido na região sul de Santa Catarina nesse ano foi contabilizada como sendo de 236.272,2 toneladas.

Figura 26: Resíduos produzidos por cidade na região sul de Santa Catarina - 2020.



Fonte: SNIS (2021).

Figura 27: Resíduos produzidos por habitante na região sul de Santa Catarina – 2020.



Fonte: SNIS (2021).

Uma outra análise de dados foi obtida das informações do Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e de Rejeitos do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina – IMA. Esses dados foram disponibilizados com o objetivo de criar um mecanismo de controle das etapas do ciclo de vida de um resíduo, através da Lei 15.251, de 3 de agosto de 2010, que instituiu o Manifesto de Transporte de Resíduos. No ano de 2014, o IMA lançou, por meio da Portaria FATMA 242/2014, o Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e de Rejeitos, possibilitando a geração desses documentos previstos em lei (IMA - Boletim Mensal, 2020).

No ano de 2019 o Boletim de Desempenho de Resíduos do Estado de Santa Catarina apresentou para a região sul do estado uma movimentação de 1.360.879,67 t de descarte e resíduos de madeira, 774.824,64 t de aparas, serragem e aglomerados de madeira, não contemplados no item inicial, como os dois grandes blocos de movimentação de resíduos nessa região. Logo, um total de 2.135.704,31 t de biomassa de madeira foi movimentada no sul do estado de Santa Catarina, o que representa também um importante resíduo que pode ser utilizado para obtenção de energia na região.

Os dados do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) no ano de 2018 indicam três pontos de instalação de aterros sanitários no sul do estado de Santa Catarina (Figura 28),

sendo um na cidade de Pescaria Brava, um na região de Urussanga e outro na cidade de Içara (PERS, 2018).

Figura 28: Aterros Sanitários em Santa Catarina – destaque região sul.



Fonte: PERS (2018).

Como pode ser verificado, atualmente, em Santa Catarina, por ausência de aterros sanitários próprios ou próximos, diversos municípios dispõem seus resíduos em unidades com distâncias significativas, encarecendo, em muito, o custo global de manejo da prefeitura com o transporte e a disposição final dos resíduos sólidos (PERS, 2018). Um exemplo claro pode ser verificado na Região de Laguna (Tabela 5), onde 12 cidades centralizam seus resíduos no aterro sanitário de Pescaria Brava:

Tabela 5: Cidades que encaminham resíduos para Aterro de Pescaria Brava

Município	Distância em relação ao aterro (Pescaria Brava)
Armazém	37 km
Capivari de Baixo	7,9 km
Gravatal	32 km
Imaruí	67 km
Imbituba	42 km
Jaguaruna	34 km
Laguna	23 km
Pescaria Brava	9,9 km
Sangão	40 km
São Martinho	52 km
Treze de Maio	40 km
Tubarão	15 km

Fonte: Autor, 2021 (dados do PERS (2018), distâncias calculadas com Google Maps).

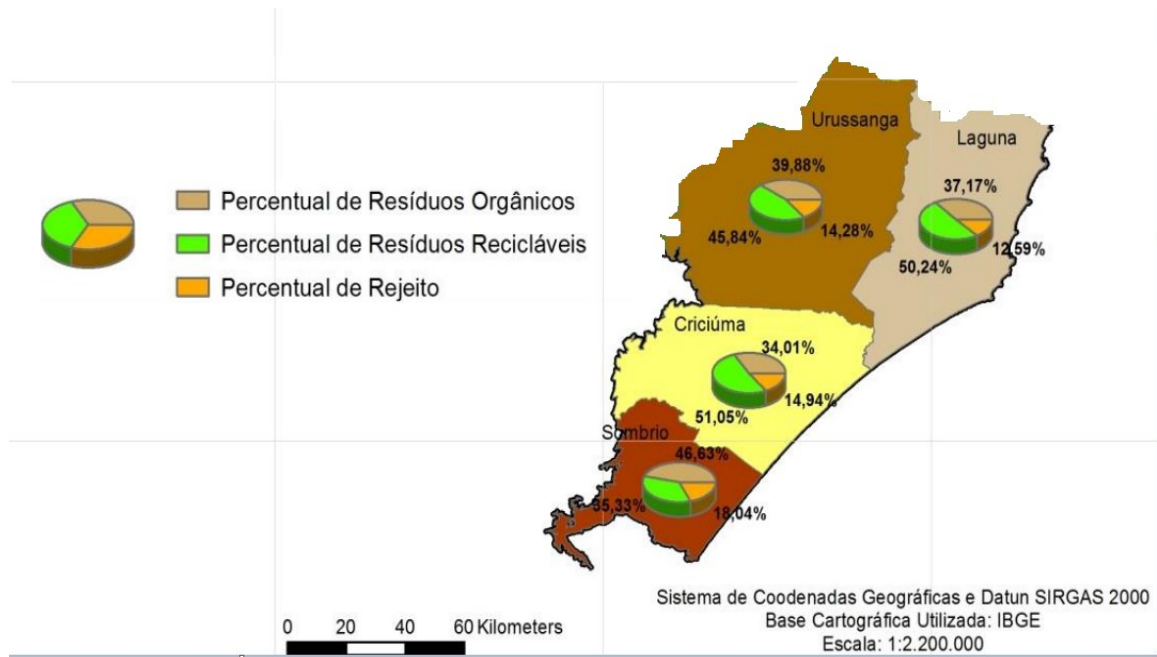
Uma informação importante para determinação da quantidade de energia dos resíduos é a sua caracterização (SOARES, 2011; PERS, 2018). O PERS 2018 utilizou para a caracterização dos resíduos gerados no estado os dados da gravimetria obtidos diretamente com os municípios por meio de questionário ou os dados apresentados nos planos de resíduos sólidos (municipais e intermunicipais). Na ausência de dados, para um determinado município, utilizou-se os dados da caracterização ponderada do estado contida no Plano Diretor para a Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado de Santa Catarina. Como uma média para o estado obteve-se a seguinte composição: 43,86% para a fração orgânica; 37,47% para os recicláveis; e 18,67% para rejeitos (PERS, 2018).

Para a região sul do estado tem-se as seguintes análises (Figura 29):

- ✓ Região de Araranguá: 46,63% para a fração orgânica, 35,33% para os recicláveis e 18,04% para rejeitos;
- ✓ Região de Criciúma: 34,01% para a fração orgânica, 51,05% para os recicláveis e 14,94% para rejeitos;
- ✓ Região de Laguna: 37,13% para a fração orgânica, 50,24% para os recicláveis e 12,59% para rejeitos;

- ✓ Região de Urussanga: 39,88% para a fração orgânica, 45,84% para os recicláveis e 14,28% para rejeitos.

Figura 29: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no sul de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de PERS, 2018.

Apesar das fontes de dados disponibilizada, estudos comprovam que cada cidade possui suas próprias características de resíduos, sendo que as quantidades e diversidades também variam ao longo do ano. Além disso, deve ser considerado o comportamento da sociedade, bem como tendências tecnológicas e aspectos culturais (SOUTO e POVINELLI 2013; GOUVEIA, 2012).

Como forma de exemplificar essa característica de variação, apresenta-se a composição gravimétrica para algumas das cidades contempladas na área em estudo, segundo dados de alguns trabalhos sobre o tema, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Composição gravimétrica de RSU bruto de alguns municípios do sul de SC.

Cidade		Laguna/SC ¹	Araranguá/SC ²	Criciúma/SC ³
Tipo de resíduo		Percentual em massa %		
Resíduo orgânico		38,02	60	33,21
Papel/papelão		11,29	9,5	13,67
Isopor		0,72	4,5	13,18
Tetrapak		1,62		
Plástico filme		12,55		
Plástico rígido		5,29		8,2
Vidro		1,62	2,7	5,96
Metais	alumínio	0,8	3,3	2,48
	aço	2,05		
	outros	0,61		
Madeira		0,24	15	23,3
Têxteis e couro		5,39		
Sanitário		13,79	5	
Resíduos perigosos (classe I - ABNT)		5,05		
Outros		0,96		

Fonte: 1- Gomes (2020); 2- Rossi (2014); 3- Guadagnin, Selau e Cadorin (2018).

Como o objetivo do estudo não é a utilização integral dos resíduos sólidos urbanos para a produção de energia, contemplando a reciclagem como método mais eficiente na hierarquia do gerenciamento de resíduos sólidos (VIEIRA 2019), verificou-se, a partir de um sistema de reciclagem convencional, o percentual médio de geração de não recicláveis, que serviriam para essa utilização.

O modelo adotado para verificação da parcela de não recicláveis foi o acompanhamento de uma cooperativa de reciclagem implantada na mesma região. Foi utilizado uma Cooperativa de trabalho de catadores de material reciclável, que desenvolve atividades de reciclagem no Centro de Triagem de Resíduos do Município de Imbituba (SC), localizado no bairro Vila Nova Alvorada. A cooperativa opera com a coleta seletiva de recicláveis, recolhendo uma média mensal de quase 120 t de material no ano de 2020.

Através do acompanhamento do funcionamento da instituição pôde ser verificado o percentual médio de não recicláveis em um ano de operação do empreendimento, que seriam as quantidades de material passíveis de serem utilizados no combustível.

O percentual médio obtido de uma análise histórica (ano de 2020) referente aos materiais não recicláveis que chegam ao empreendimento, foi de 21,54%. Os dados mensais

podem ser acompanhados na Tabela 7. Para efeito de cálculo, foi adotado o valor de 20,0% como uma média anual que poderia ser aplicado para a região em estudo.

Tabela 7: Dados operacionais da cooperativa de tratamento de material reciclável da cidade de Imbituba / SC.

	Data	Jan/20	Fev/20	Mar/20	Abr/20	Mai/20	Jun/20	Média	
1º semestre	Total coletado (ton)	138,68	97,06	83,67	94,74	106,97	132,21	108,89	
	Rejeito gerado (ton)	26,70	18,18	9,85	18,39	15,90	20,77	18,30	
	Rejeito gerado (%)	19,25	18,7%	11,77	9,41%	14,86	15,71	16,62	
	Data	Jul/20	Ago/20	Set/20	Out/20	Nov/20	Dez/20	Média	Média anual
2º semestre	Total coletado (ton)	118,60	128,93	114,71	127,69	137,37	159,19	131,08	119,99
	Rejeito gerado (ton)	33,20	28,67	30,92	44,64	39,00	29,02	34,24	26,27
	Rejeito gerado (%)	27,99	22,24	26,95	34,96	28,39	18,23	26,4%	21,54%

Fonte: Autor (2021).

O total de resíduos produzidos pela cidade de Imbituba e demais dados de coleta são resumidos na Tabela 8, obtido a partir do SNIS, para o ano base de 2020.

Tabela 8: Dados de geração de resíduos da cidade de Imbituba / SC.

Diagnóstico - Características SNIS	IMBITUBA	
População Atendida	45.286	habitantes
Geração de resíduos em 2020	21.500.700	Kg
Taxa de geração per capta	1,3	Kg/hab
Recicláveis recuperados 2020	1.350.000	Kg
Taxa de resíduos recicláveis recuperados	6,279%	%
Taxa de resíduos aterrados	93,721%	%
Taxa de resíduos recicláveis estimada	50,00%	%

Fonte: SNIS (2021).

Como opções de biomassa disponíveis tem-se os resíduos da indústria de madeira (apresentados pelo levantamento da IMA) e da rizicultura regional. A escolha prioritária pela utilização de biomassa de arroz (palha ou casca) pode ser entendida pela grande área cultivada na região sul de Santa Catarina (Tabela 9), contando com, aproximadamente 100 mil hectares

(EPAGRI, 2020). Além disso, os dados do IMA possuem maior grau de complexidade para relacionar-se a cidade de origem ou destino. Por esse motivo não foram utilizados no estudo.

Tabela 9: As 11 regiões mapeadas de cultivo de arroz e o total de Santa Catarina.

Região	Área (ha)	%
Araranguá	58.849	39,34%
Criciúma	21.912	14,65%
Tubarão	18.941	12,66%
Joinville	18.226	12,18%
Rio do Sul	10.695	7,15%
Itajaí	9.479	6,34%
Blumenau	7.123	4,76%
Tijucas	2.161	1,44%
Florianópolis	1.902	1,27%
Ituporanga	171	0,11%
Tabuleiro	132	0,09%
TOTAL	149.591	100,00%

Fonte: Adaptado de EPAGRI (2020).

A produção de arroz levantada pela EPAGRI (2021) foi de 1,25 milhão de toneladas do grão na safra de 2020/21, dos quais pode-se esperar uma geração de cerca de 1,5 milhões de toneladas de resíduos de biomassa em forma de casca e palha para Santa Catarina. Para a região sul, pode-se estimar, pela área cultivada, uma produção de 999.750,00 t.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DA RIZICULTURA DA REGIÃO

Os resultados de caracterização imediata para as amostras de biomassa (palha e casca de arroz) são apresentados nesta seção do trabalho. As características físicas das amostras desses componentes como recebidas e após processo de moagem são apresentadas em detalhe na Figura 30.

Figura 30: Amostras de biomassa da rizicultura do sul de Santa Catarina – como recebida e moída (60 mesh).



Fonte: Autor (2021).

O poder calorífico superior e inferior foi calculado a partir dos dados de análise imediata, sendo especificados no item 3.2.5 (através das fórmulas 10 e 13).

Na Tabela 12 são apresentados os resultados de análise imediata e poder calorífico encontrados para a biomassa de arroz do sul de Santa Catarina – região de Tubarão. Os resultados de análise da biomassa da rizicultura apresentam-se como passíveis de utilização como combustível. Relacionando-se com as referências bibliográficas sobre o assunto (MIYAKE, 2011; KLEVESTON, 2011), chega-se as seguintes informações complementares:

1. O teor de umidade das amostras (~10%) reflete o encontrado em outros estudos. Embora seja uma quantidade relativamente alta, apresenta menos umidade se comparado a outros tipos de biomassa. A umidade pode refletir diretamente na qualidade energética do material (menor poder calorífico inferior – PCI) e está relacionada à exposição a umidade e ao tipo de colheita;
2. O teor de carbono fixo varia entre a casca de arroz e a palha sendo maior na casca, porém, para ambos os materiais também é bem próximo aos valores pesquisados na literatura;
3. A quantidade de cinzas está de acordo com o encontrado na literatura, o que se traduz como um combustível com menor teor de inertes e com menor possibilidade de influência no trocado de calor (acúmulos de cinzas) em relação ao carvão mineral;
4. Em relação ao teor de voláteis, o valor encontrado é muito próximo ao pesquisado. Essa característica é positiva em relação a estabilidade da combustão, principalmente em relação a possibilidade de uso em co-combustão com carvão mineral.

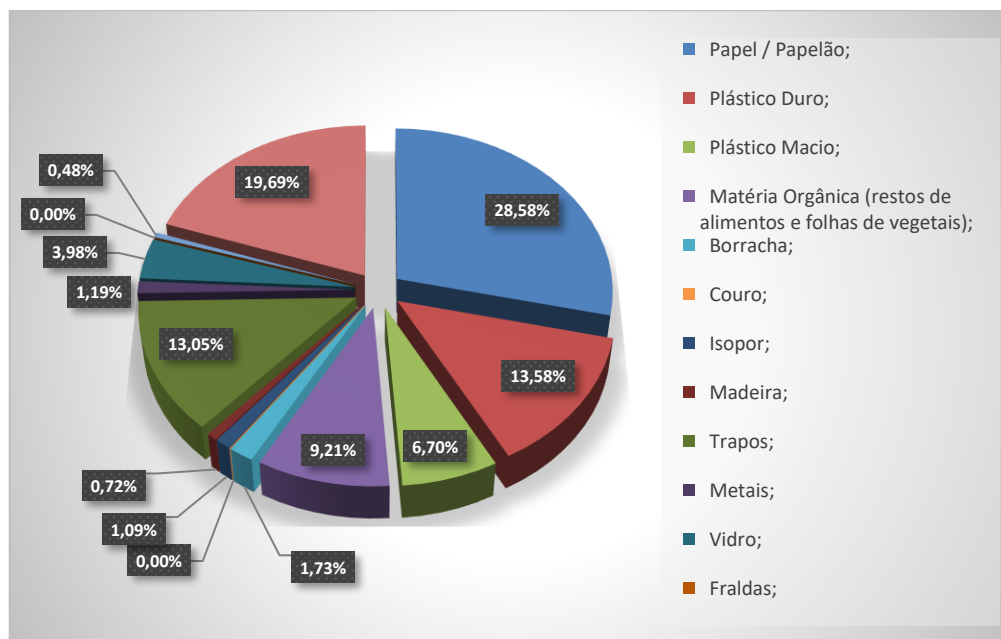
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO DE RECICLAGEM - RSU

A primeira etapa de caracterização do rejeito (RSU) do processo de reciclagem foi a determinação da composição gravimétrica, que foi realizada a partir dos procedimentos especificados no item 3.2.1.

Na Figura 31, na Figura 32 e na Figura 33 foram ilustrados os resultados da caracterização gravimétrica dos RSU provenientes dos rejeitos da cooperativa de reciclagem de Imbituba, realizada nos dias 07/04/2021, 24/07/2021 e 06/11/2021 (três períodos do ano).

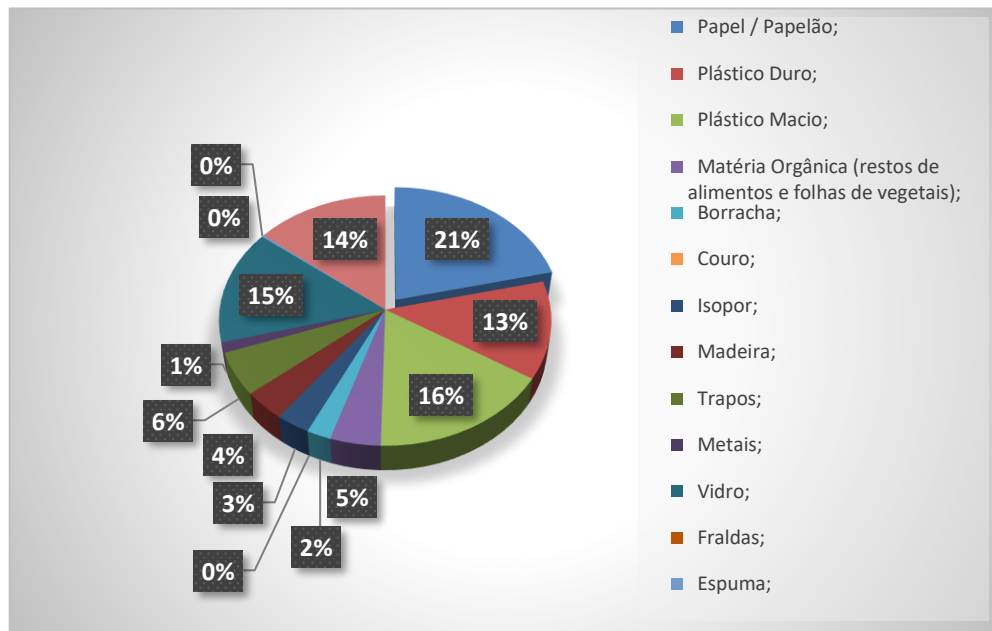
Percebeu-se na amostra uma grande concentração de papel, em especial toalhas e papel higiênico de diversos tipos. A maior parte desse material foi separada como rejeito devido ao risco de contaminação. Esse ponto demonstra claramente uma ineficiência no processo de separação e coleta de recicláveis no município (Tabela 10).

Figura 31: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imbituba/SC-coleta 1.



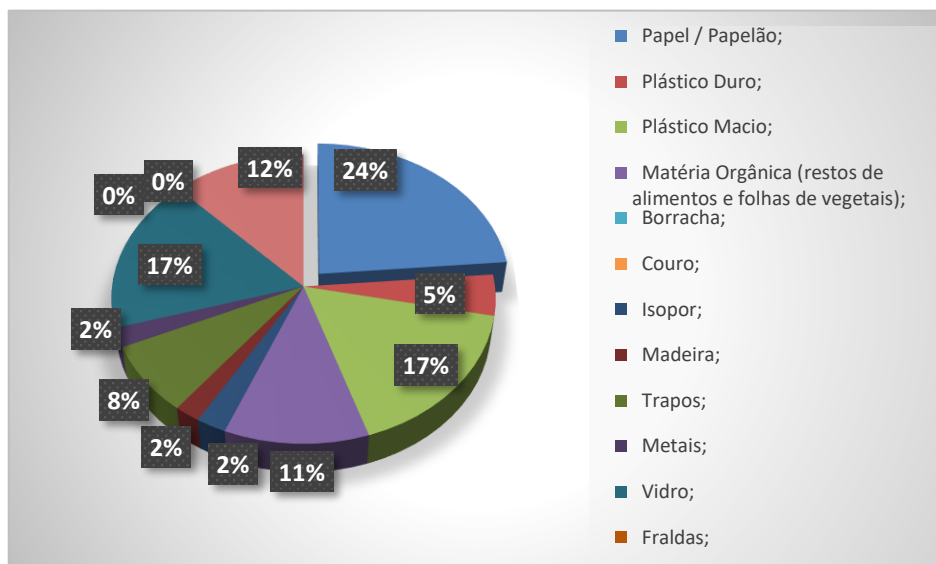
Fonte: Autor (2021).

Figura 32: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imituba/SC-coleta 2.



Fonte: Autor (2021).

Figura 33: Composição gravimétrica dos rejeitos da reciclagem de RSU de Imituba/SC-coleta 3.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 10: Distribuição gravimétrica RSU – média.

Frações	Média (kg)	desvio padrão (kg)	% amostra (%)
Papel / Papelão	2,756	± 0,222	24,5%
Plástico Duro	1,189	± 0,639	10,3%
Plástico Macio	1,565	± 0,817	13,3%
Matéria Orgânica	0,910	± 0,285	8,3%
Borracha	0,157	± 0,151	1,3%
Couro	0,000	± 0,000	0,0%
Isopor	0,259	± 0,155	2,2%
Madeira	0,268	± 0,229	2,2%
Trapos	0,961	± 0,294	8,8%
Metais	0,175	± 0,054	1,5%
Vidro	1,421	± 0,893	12,0%
Fraldas	0,000	± 0,000	0,0%
Espuma	0,026	± 0,024	0,2%
Outros	1,730	± 0,381	15,3%
TOTAL	11,417	± 2,022	100,0%

Fonte: Autor (2021).

A segunda etapa de caracterização foi a secagem das frações de RSU para determinação do teor de umidade das amostras, conforme procedimento 3.2.2.

Na Tabela 11 é possível visualizar que as amostras com maior teor de umidade são as de matéria orgânica, com 7,35%, como já esperado e apresentado em outros trabalhos sobre o assunto. As amostras secas como vidro e metal apresentaram reduzido teor de umidade.

O percentual de umidade total da amostra foi de 4,63% (média das 3 amostras), considerada baixa em comparação com outros trabalhos semelhantes. Soares (2011) traz teores de umidade de 23% a 57%. Isso pode ser explicado em parte pelo reduzido percentual de amostra de matéria orgânica (que possui alto teor de umidade) devido ao pré-tratamento e separação do RSU durante o processo de triagem. Isso é positivo, principalmente quando se deseja a produção de um combustível com maior densidade energética.

Outro ponto verificado é uma grande presença de plásticos, em especial o isopor (poliestireno expandido) no material recolhido nas amostragens e que foi confirmado como comum pelo pessoal da cooperativa de reciclagem de Imbituba / SC. Isso pode ser relacionado, em parte, pelo maior consumo de *delivery* e lanches, devido ao confinamento social estabelecido pela pandemia da COVID- 19.

Tabela 11: Teor de umidade das frações de rejeitos de RSU.

Amostra	Teor de umidade (%) BU	Desvio padrão
Papel / Papelão	5,46%	$\pm 0,67\%$
Plástico Duro	3,66%	$\pm 1,74\%$
Plástico Macio	6,49%	$\pm 5,47\%$
Matéria Orgânica	7,35%	$\pm 1,19\%$
Borracha	0,11%	$\pm 0,19\%$
Couro	0,00%	$\pm 0,00\%$
Isopor	4,93%	$\pm 4,11\%$
Madeira	6,52%	$\pm 4,39\%$
Tapos	5,95%	$\pm 1,12\%$
Metais	0,84%	$\pm 0,82\%$
Vidro	0,82%	$\pm 0,75\%$
Fraldas	0,00%	$\pm 0,00\%$
Espuma	2,50%	$\pm 2,20\%$
Outros	2,68%	$\pm 2,37\%$
TOTAL	4,63%	$\pm 0,96\%$

Fonte: Autor (2021).

Os resultados individuais de cada coleta para distribuição gravimétrica e teor de umidade estão reunidos nos Anexos M, N e O.

De forma complementar, para determinar as características de combustibilidade das frações de RSU utilizadas na produção das misturas compactadas, realizou-se a determinação de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, utilizando-se o TGA. Além disso, aproveitando-se das equações 08 e 13, foi determinado (calculado) o poder calorífico superior e inferior das frações. Para cada item foram analisadas (no mínimo) três amostras, sendo a média de cada parâmetro apresentada na Tabela 12. Os resultados individuais de cada análise TGA para as frações RSU utilizadas estão reunidos no Anexo P.

Pode ser verificado que as frações de plástico possuem a maior representatividade no teor de energia na mistura, contudo optou-se pela utilização das demais frações de papel, por considerar significativo seu poder calorífico (20% superior) em relação à biomassa base (mistura de palha e casca de arroz).

4.4 PRODUÇÃO DOS COMPACTADOS:

As amostras de combustíveis derivados de RSU e biomassa compactados produzidos apresentaram boas características de regularidade e resistência mecânica inicial. Dentre as três temperaturas de conformação utilizadas, verificou-se uma maior facilidade de desmoldagem naqueles produzidos na temperatura de 100 °C (em qualquer percentual de RSU adicionado) – Figura 34.

Figura 34: – Produção briquetes em 100°C (a partir da esquerda: 0, 10% e 20% de RSU)



Fonte: Autor (2021).

Porém, é importante mencionar que não houve trincamento dos compactados na ocasião da desmoldagem em qualquer dos itens produzidos. O perfil de aquecimento foi monitorado e está apresentado no Anexo H. Destaca-se que houve uma característica de elevação de temperatura praticamente constante para todas as faixas utilizadas. A título de informação, o controle de temperatura da estufa foi ajustado, para todas as bateladas, em 30 °C superior a temperatura desejada na amostra. Os compactados obtidos foram apresentados na Figura 35.

Um item não analisado a longo prazo foi a ação de atividade biológica ao longo do tempo sobre o combustível compactado. Contudo, em ambiente aberto as peças não sofreram ataque biológico dentro do período de 14 dias no teste de intemperismo.

Figura 35: Combustíveis derivados de RSU e biomassa compactados obtidos.



Fonte: autor (2021)

4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta seção foram avaliadas as propriedades químicas dos materiais utilizados, assim como para as misturas obtidas para produção dos combustíveis compactados.

Comparou-se os resultados obtidos com aqueles produzidos por autores que trabalharam em projetos de pesquisa anteriores sobre produção de CDR. Além disso, como referência de qualidade do combustível derivado de resíduos, as propriedades foram relacionadas a normas atualmente aplicadas, sendo uma nacional e outra internacional, que tratam de combustíveis derivados de resíduos.

As propriedades dos materiais foram apresentadas na sequência, incluindo as análises imediata, elementar e do conteúdo energético. A Tabela 12 mostra as características químicas dos componentes e misturas utilizadas na produção dos combustíveis compactados.

Tabela 12: Resultados da caracterização química dos componentes e das misturas utilizadas na produção dos combustíveis compactados.

Material	Palha arroz (PA)	Casca arroz (CA)	Biomassa arroz - BA (15%CA e 85%PA)	Plástico mole (PM)	Papel/ papelão (PP)	Isopor (IS)	RSU (PP- 78,6%; PM- 18,4%; IS - 3,0%)	Mistura 1 (0% RSU) (100% BA)	Mistura 2 (10% RSU) (90% BA)	Mistura 3 (20% RSU) (80% BA)
<i>Análise imediata</i>										
Cinzas (%) (CR)	17,61 (± 0,06)	12,03 (± 0,09)	16,44 (± 0,46)	4,70 (± 0,91)	6,46 (± 0,43)	2,78 (± 0,36)	5,83 (± 0,41)	16,44 (± 0,46)	14,00 (± 1,16)	13,71 (± 1,27)
Material volátil (%) (CR)	65,89 (± 0,35)	66,61 (± 0,59)	67,28 (± 0,39)	76,73 (± 0,72)	75,19 (± 0,35)	78,18 (± 0,32)	75,74 (± 0,40)	67,28 (± 0,39)	69,26 (± 0,94)	69,54 (± 1,04)
Carbono fixo (%) (CR)	5,60 (± 0,37)	11,24 (± 0,58)	7,02 (± 0,33)	16,31 (± 1,41)	9,65 (± 0,09)	17,54 (± 0,54)	10,65 (± 0,30)	7,02 (± 0,33)	8,51 (± 0,66)	8,65 (± 0,70)
Umidade (%) (CR)	10,91 (± 0,05)	10,12 (± 0,04)	9,26 (± 0,30)	2,25 (± 1,21)	8,70 (± 0,01)	1,50 (± 0,51)	7,77 (± 0,28)	9,26 (± 0,30)	8,23 (± 0,45)	8,11 (± 0,50)
<i>Análise elementar</i>										
C (%) (BS)	–	–	38,25	–	–	–	47,4	38,25	39,17	40,08
H (%) (BS)	–	–	5,62	–	–	–	6,91	5,62	5,75	5,88
N (%) (BS)	–	–	0,83	–	–	–	0,40	0,83	0,79	0,74
S (%) (BS)	–	–	0,06	–	–	–	0,03	0,06	0,06	0,05
O (%) (BS)	–	–	38,46	–	–	–	39,83	38,46	38,6	38,73
Cl (%) (BS)	–	–	0,53	–	–	–	0,19	0,53	0,50	0,46
<i>Poder calorífico</i>										
PCS (MJ.kg⁻¹) (CA)	–	–	16,57	–	–	–	20,41	16,57	–	–
PCS (MJ.kg⁻¹) (CL)	12,10 (± 0,08)	14,25 (± 0,12)	–	17,68 (± 0,62)	15,07 (± 0,09)	18,35 (± 0,24)	20,42	–	16,95	17,33
PCI (MJ.kg⁻¹) (CL)	10,58 (± 0,08)	12,75 (± 0,12)	15,95	16,36 (± 0,65)	13,60 (± 0,09)	17,05 (± 0,25)	19,73	15,95	16,33	16,70

Notas: CR - Como recebido; BS - Base seca; CA - Análise em calorímetro; CL - Calculado (base análise elementar ou imediata); BA - Biomassa de Arroz; PA - Palha de arroz; CA - Casca de arroz; PM - Plástico mole; IS - Isopor.

Fonte: Autor (2022).

4.5.1 Análise imediata e elementar

Os resultados das análises imediata e elementar para as matérias-primas e misturas utilizadas neste trabalho foram indicados na Tabela 12. Para a análise elementar considera-se: O= oxigênio (% em massa); C= carbono (% em massa); H= hidrogênio (% em massa); S= enxofre (% em massa); N= nitrogênio; Cl = Cloro (% em massa). Para a análise imediata tem-se: Cz= cinza (% em massa); CF = carbono fixo (% em massa); VL = material volátil; UM = umidade total (% em massa). O Anexo E apresenta o resultado das análises laboratoriais.

Para as análises elementares pode-se apontar C, H e O como principais componentes dos combustíveis produzidos. O, C e H contribuem positivamente para um maior poder calorífico (PCS), sendo que o conteúdo de H também influencia o poder calorífico inferior (PCI), devido à formação de água (VIRMOND et al., 2012). O teor de O é positivo para o combustível por incidir em menor necessidade de ar (oxigênio) para a combustão.

Para a análise elementar das misturas, lembra-se que foi realizado uma média ponderada em relação aos valores obtidos para cada fração constituinte que foi analisada. Para a análise imediata realizou-se quatro análises para cada amostra a ser compactada.

Entre as composições obtidas, a mistura 3 apresentou os maiores teores de C e H, além de material volátil, em comparação às outras amostras. Isso pode ser explicado pela maior participação de RSU na constituição (20% em massa). A combinação do alto teor de voláteis encontrado e do alto conteúdo de C torna a mistura 3 atraente como fonte de energia.

Obernberger e colaboradores (2006) comentaram que problemas de emissão relacionados a biocombustíveis sólidos podem ser esperados quando a concentração de N se apresenta acima de 0,6 % em peso. Isso pode ocorrer durante a combustão das frações 1, 2 e 3, por resultar em concentrações de óxido de nitrogênio (NOx) acima do esperado. Porém para esse componente de emissão, outros fatores também são determinantes, como o excesso de ar e a temperatura de combustão.

O reduzido teor de enxofre nas misturas (<0,06%) é um ponto positivo, pois esse componente presente no combustível formará emissões de SOx durante a combustão. As fontes de biomassa vegetal, em geral, não apresentam enxofre em sua composição, como observado na Tabela 12, para palha e casca de arroz.

O teor de cloro é um ponto importante a ser determinado quando se trata de combustíveis derivados de resíduos, por estar relacionado à operacionalidade do trocador de calor e a emissões nocivas. Os teores de cloro em resíduos sólidos urbanos são provenientes principalmente dos plásticos, compósitos, combustíveis e resíduos alimentares (VICZEK et

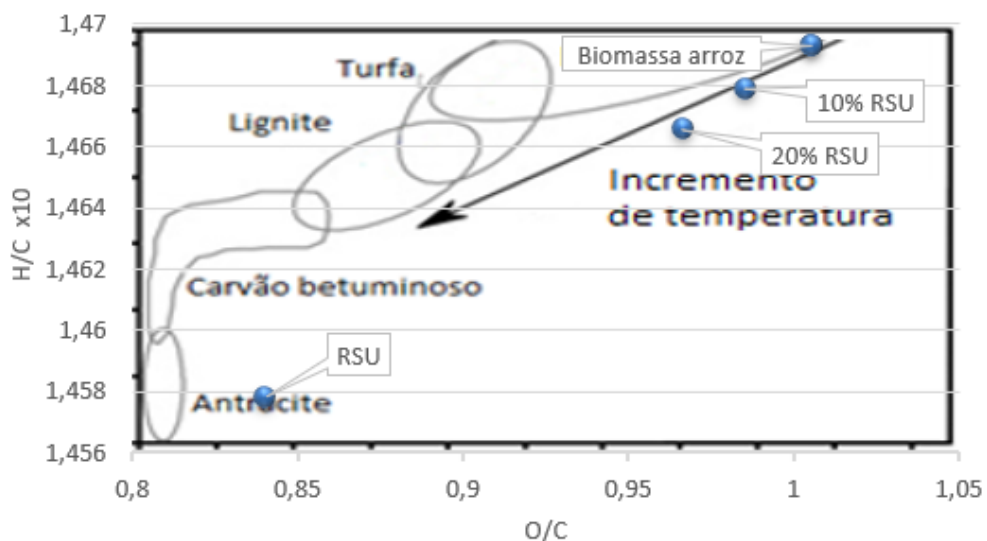
al., 2020). As maiores concentrações de cloro são observadas em produtos de PVC, incluindo bainhas e tubos elétricos e em plásticos não embalados, que também podem conter PVC (VICZEK et al., 2020).

Os valores de cloro obtidos para a fração biomassa (0,53% em massa/ base seca) estão de acordo com os estudos de Vassilev e colaboradores (2010), para compactados de casca de arroz, com 0,58% (em massa/base seca). Outro ponto importante a citar é a variação na quantidade desse material em diferentes plantações, conforme verificado por Bakker e colaboradores (2013), entre 0,013% até 0,909% de cloro. Destaca-se o teor de cloro mais alto na biomassa em relação ao RSU. Esses valores podem estar vinculados aos insumos utilizados no tratamento de pragas do cultivo do arroz, combinado ao fato de que a fração utilizada de plástico (plástico mole) tem como característica a baixa quantidade de cloro na sua constituição.

Outro ponto importante que não pode ser desprezado em relação a análise elementar é a variação da composição do RSU devido a misturas de diferentes resíduos. Como a amostra de RSU utilizada nas diferentes composições foi bem homogeneizada, pode-se considerar esse efeito minimizado.

A partir da análise elementar, a relação H/C e O/C pode ser explorada através do gráfico de Van Klevelen (Figura 36), que representa o ganho energético da biomassa com a adição do RSU na mistura.

Figura 36: Gráfico de Van Klevelen com os produtos em estudo.

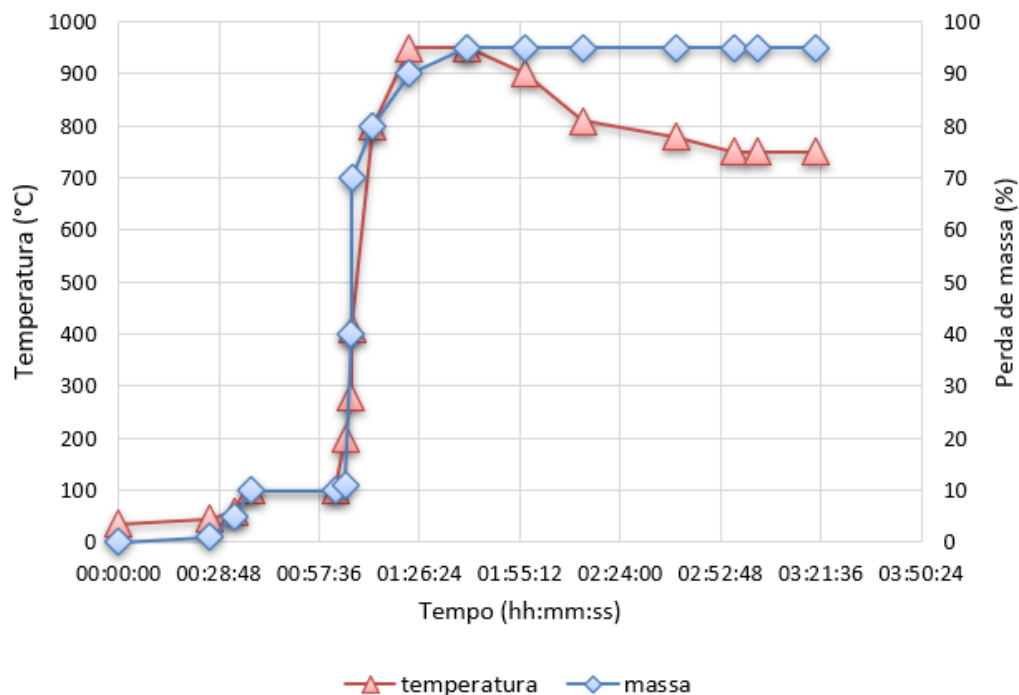


Fonte: Adaptado de Williams et al. (2012).

Para os testes de análise imediata (umidade, matéria volátil, cinzas e teor de carbono fixo) utilizou-se a termogravimetria (TGA), determinando-se as principais curvas de perda de massa para a fração RSU e biomassa (Figuras 37 e 38). Para essa análise, devido à maior facilidade de realização, foi explorado uma maior variedade de resultados, seja para as matérias-primas, seja para as misturas desenvolvidas para este trabalho (Anexos J, K, P e Q).

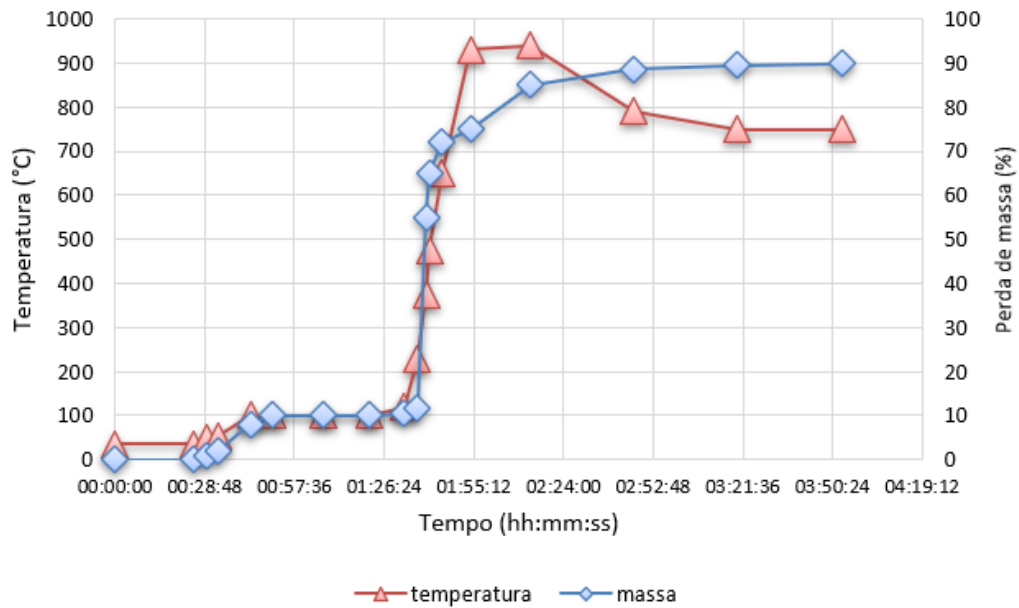
Todos os materiais e misturas utilizadas apresentaram alto teor de voláteis, variando de 65,89% (para palha de arroz) até 78,18 % (para a amostra de isopor) em peso. Para as misturas utilizadas para conformação do combustível a variação foi de 65,99% para a amostra 1 (0% de RSU) até 69,59% para a amostra 3 (20% de RSU) em peso. O teor de volátil determina uma maior facilidade de ignição e estabilidade da chama durante a combustão. No entanto, a velocidade de desvolatilização também está relacionada com a estrutura e à decomposição das partículas de biomassa na combustão (VIRMOND et al., 2012).

Figura 37: Perfil termogravimétrico da mistura RSU (papel/papelão, plástico mole e isopor).



Fonte: Autor (2021).

Figura 38: Perfil termogravimétrico da biomassa (casca arroz).



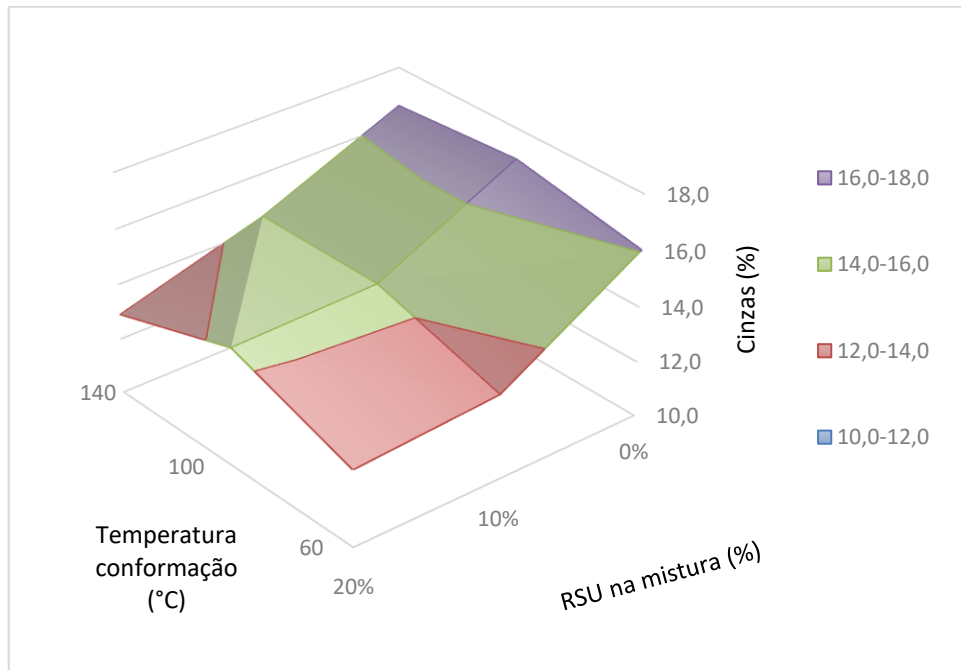
Fonte: Autor (2021).

O teor de umidade encontrado para as misturas é compatível com a maioria dos trabalhos pesquisados (6% a 12%), entre os quais citam-se os estudos de Hla e Roberts (2015), Auprakul (2019), Jaworski e Malgorzata (2020) e Gallardo et al. (2020). Outro ponto importante é que o teor de umidade, principalmente na fração biomassa, é afetada pelo método de armazenagem e pela estação do ano (período chuvoso).

A análise de cinzas é importante como forma de prever-se a perda de energia e a possibilidade de acúmulos nos trocadores de calor (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015). O aumento do teor de RSU representou uma redução do teor de cinzas da mistura em, aproximadamente, 4,0% conforme pode ser verificado na superfície de resposta - Figura 39. Esse comportamento não é o encontrado em outros trabalhos, como em Gallardo et al. (2020) e Iqbal, Nadeem e Butt (2020), em que o aumento de resíduos promoveu um aumento do teor de cinzas. Isso pode ter relação com a matéria prima utilizada (biomassa e fração do RSU).

Como em outras fontes, a fração de matéria volátil foi determinada calculando a perda de massa da queima do material em um ambiente sem consumo de oxigênio. Para o processo de co-combustão com carvão, a temperatura de ignição é reduzida com o aumento do conteúdo de matéria volátil (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015). Logo, o aumento do teor de voláteis promovido pelo RSU é favorável para o processo de queima.

Figura 39: Teor de cinzas – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021).

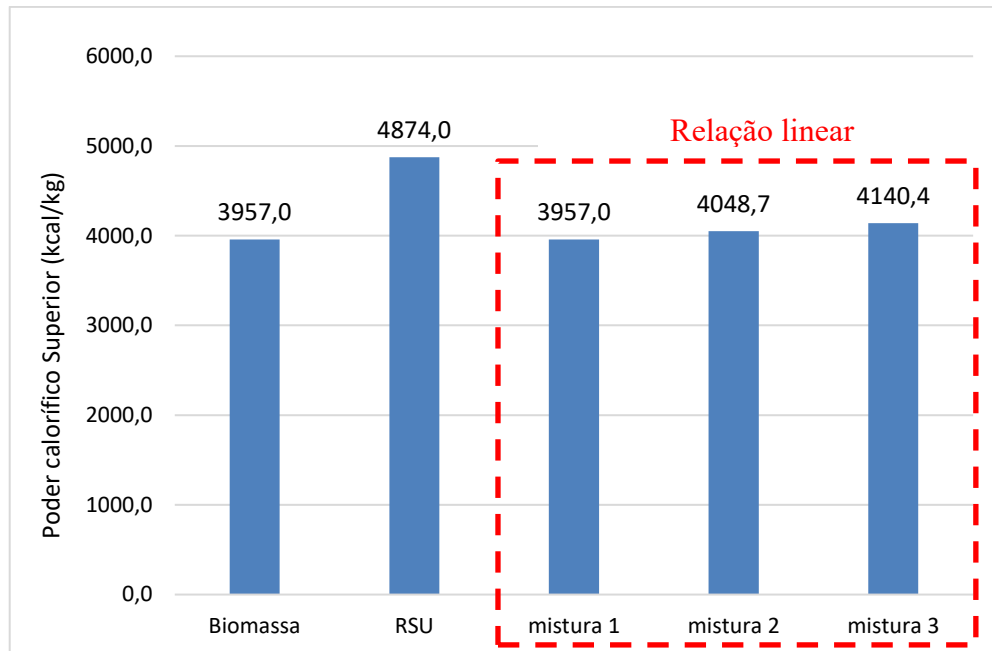
4.5.2 Poder calorífico superior (PCS)

Como verificado, os valores de PCS podem ser obtidos a partir de análises elementares ou por calorimetria. Neste trabalho foram empregados esses dois métodos. Os valores de PCS obtidos a partir das análises elementares (obtidos algebricamente) aplicando-se as Equações 11 para RSU e 12 para biomassa, foram apresentados na Tabela 12.

O uso de calorímetro foi realizado nos estudos de Sing et al. (2012), Faizal et al (2016), Chaitanya et al (2017) e Song et al (2020), onde as amostras de compactados de biomassa foram testadas com base na norma ASTM D240 (ASTM, 2019). Os valores encontrados nesses estudos estão entre 18,00 e 22,33 MJ/kg (base seca) com até 60% de participação de RSU na mistura, para diferentes tipos de biomassa. Os dados obtidos através do calorímetro são também apresentados na Tabela 12, onde pode-se comparar os valores àqueles obtidos da análise elementar:

Aplicando-se uma relação linear em relação aos valores de poder calorífico encontrados nos componentes de RSU e biomassa, chega-se aos seguintes valores de energia para as misturas (Figura 40).

Figura 40: Resultados obtidos para o PCS da biomassa, RSU e misturas.



Fonte: Autor (2021).

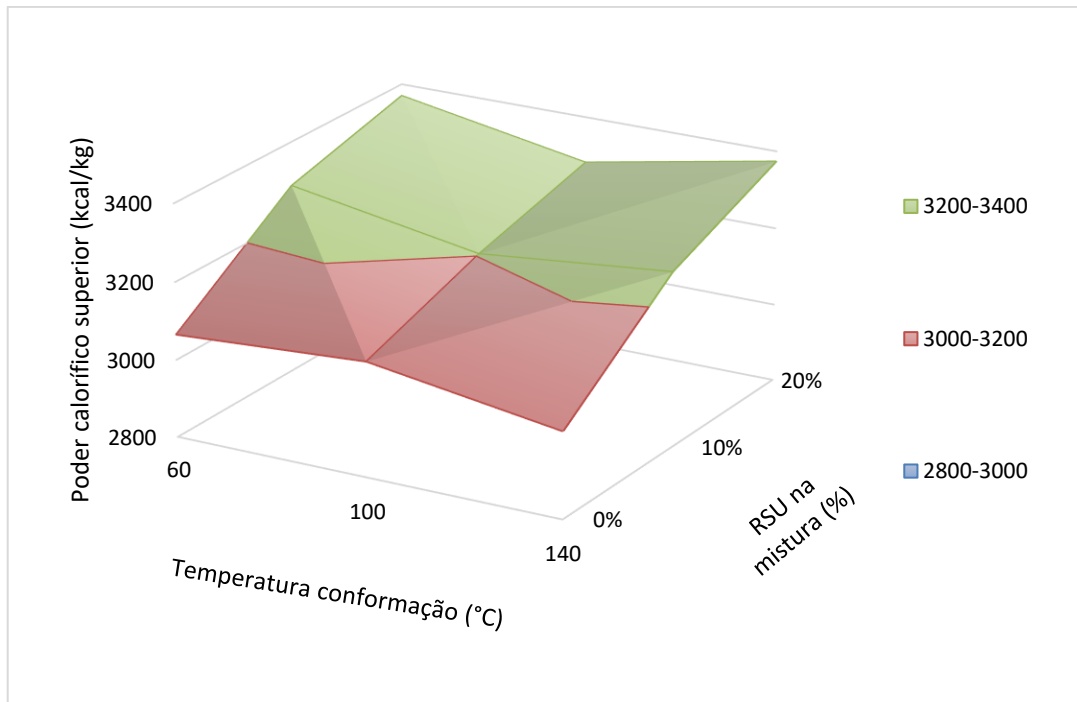
Verifica-se que o teor energético das misturas deste trabalho é menor que aquele citado nos trabalhos pesquisados para compactados de biomassa e RSU (SING et al., 2012; FAIZAL et al., 2016; CHAITANYA et al., 2017 e SONG et al., 2020) devido ao tipo de biomassa, assim como o percentual e o tipo de RSU utilizado.

O poder calorífico superior dos materiais utilizados variou de 12,10 MJ/kg para a biomassa de palha de arroz, até 20,41 MJ/kg para a mistura de RSU.

A norma DIN 51731 (DIN, 1996), que trata de qualidade de briquetes de biomassa, traz que o poder calorífico superior deve ser superior a 17,5 MJ/kg (4.186 kcal/kg) (FAIZAL et al., 2016). Logo, percebe-se que nenhuma das amostras (misturas) utilizadas para produção dos compactados deste trabalho atinge o valor mínimo exigido por essa normativa.

Aplicando-se os resultados de análise imediata das diferentes amostras para determinação do PCS, chega-se à superfície de resposta apontada na Figura 41. Nota-se que as variações não são significativas e são diretamente relacionadas à quantidade de RSU na mistura, que faz com haja um aumento da quantidade energética do combustível. As pequenas variações em relação aos tratamentos entre temperaturas de compactação não são consideradas respostas desse item, mas sim da variabilidade do teor energético da própria biomassa e, mais significativo ainda, do RSU utilizado.

Figura 41: PCS – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021).

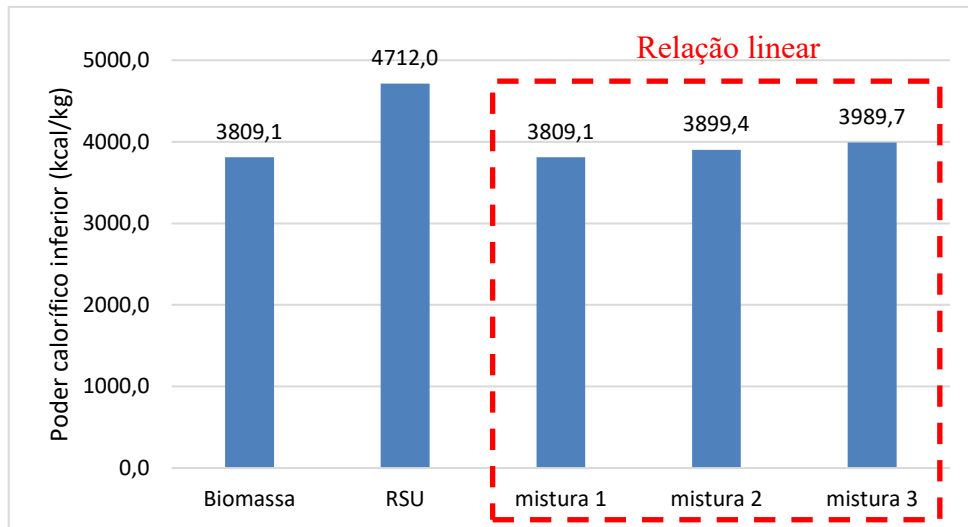
4.5.3 Poder Calorífico Inferior (PCI)

Utilizando-se da metodologia apresentada no item 3.2.5, considerando as amostras secas, chega-se aos valores de PCI (poder calorífico inferior dos materiais) apresentados na Tabela 12.

Aplicando-se a mesma relação linear realizada para o PCS, chega-se aos valores de PCI para as composições e matérias primas utilizadas no estudo. A Figura 42 apresenta o PCI para cada fração utilizada e para as respectivas misturas, utilizando-se a relação linear (considera-se mistura homogênea).

Entre as composições utilizadas, aquela que apresentou maior PCI foi a mistura 3, com 16,70 MJ/kg. Isso representa um valor aproximadamente 5,0% superior ao valor encontrado para o PCI da biomassa de palha e casca de arroz (15,95 MJ/kg). A adição de RSU à biomassa base trouxe benefícios energéticos ao combustível, com maior energia disponível por massa.

Figura 42: Resultados obtidos para o PCI da biomassa, RSU e misturas.



Fonte: Autor (2021).

Comparando os resultados obtidos com os padrões europeus apontados por Gallardo et al (2020) na Tabela 13, pode-se observar que o combustível obtido se enquadraria como classe 2. Em relação à norma ABNT 16849/2020 (Tabela 14), o combustível obtido se enquadraria como classe 2 (P2 e C2). Destaca-se que a análise de mercúrio não foi realizada neste trabalho.

Tabela 13: Padrões de qualidade de CDR na Europa (UNE-EN 15359, 2012).

Parâmetro de Classificação	Medida estatística	Unidade	Classes				
			1	2	3	4	5
PCI	Média	MJ/kg (CR)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cl	Média	% (BS)	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Hg	Mediana	mg/MJ (CR)	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$

Nota.: CR: como recebido; BS: em base seca.

Fonte: Adaptado de Gallardo et al. (2020).

Tabela 14: Classificação dos RSU com fins energéticos no Brasil.

Unidade	Medida	Classes		
		P1	P2	P3
Kcal/kg	PCI (base seca)			
	Limite inferior da média ($P \geq 95\%$)	$PCI \geq 4750$	$4750 > PCI \geq 3580$	$3580 > PCI \geq 2390$
%	Teor de cloro			
	Limite superior da média ($P \geq 95\%$)	$Cl \leq 0,5$	$0,5 < Cl \leq 1,5$	$1,5 < Cl \leq 3,0$
mg/kg	Teor de mercúrio			
	Média aritmética	$Hg \leq 0,1$	$0,1 < Hg \leq 0,25$	$0,25 < Hg \leq 0,50$
	Percentil de 80	$Hg_{P80} \leq 0,2$	$0,2 < Hg_{P80} \leq 0,5$	$0,5 < Hg_{P80} \leq 1$

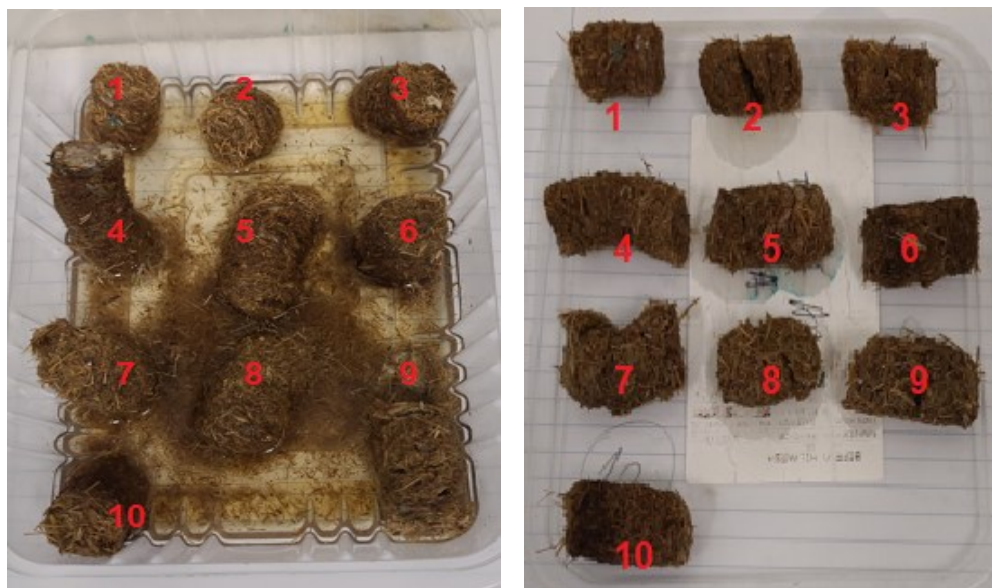
Fonte: ABNT (2020).

Outro ponto de interesse em relação à análise do poder calorífico e teor de cloro total do combustível é a possibilidade de aumentar-se a quantidade de RSU na amostra para valores acima de 20 % da mistura, melhorando esses dois itens analisados (redução do teor de cloro e aumento do PCI).

4.6 TESTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados do teste de absorção de água indicaram uma baixa resistência dos compactados à umidade. Isso implica numa redução da qualidade do combustível quanto à resistência mecânica quando úmidos. O resultado da primeira bateria de testes é apresentado na Figura 43 (Anexo L):

Figura 43: Testes de absorção de água antes (esquerda) e após secagem (direita).



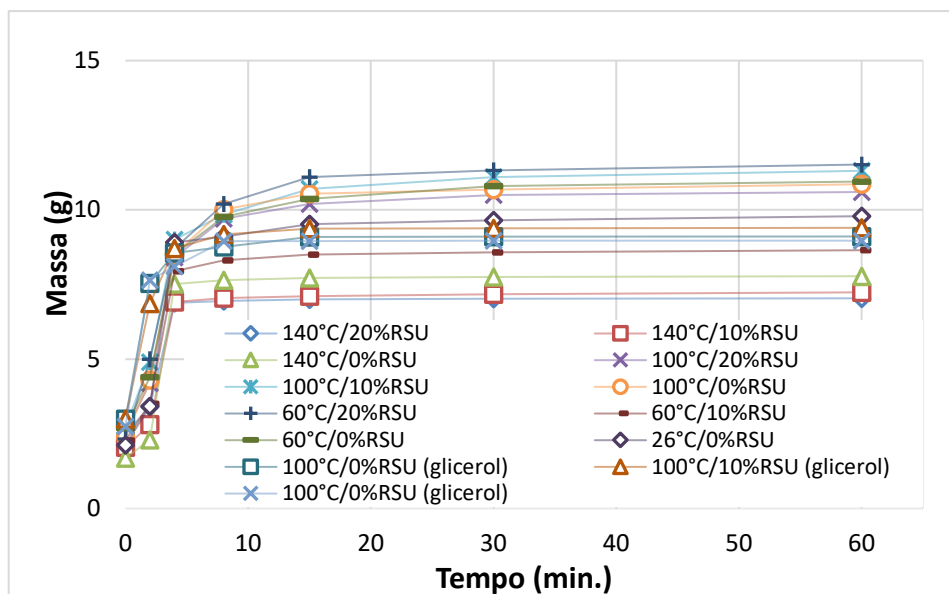
Nota: 1 - 140°C/20% RSU; 2 - 140°C/10% RSU; 3 - 140°C/0% RSU; 4 - 100°C/20% RSU; 5 - 100°C/10%RSU; 6 - 100°C/0% RSU; 7- 60°C/20% RSU; 8 - 60°C/10% RSU; 9 - 60°C/0% RSU; 10 - 26°C/0% RSU.

Fonte: Autor (2021).

Outro ponto observado, que coincide com os estudos de Sing et al. (2012) e Greinert, Mrówczyńska e Szefer (2019), é que a maioria dos compactados se desintegrou sob a influência da água, apenas algum tempo após serem molhados (menos de 1 minuto). Nesses mesmos estudos uma maior quantidade de RSU proporcionava maior resistência à umidade com menor grau de desintegração, fato que também pode ser confirmado nos experimentos realizados neste estudo.

Para este trabalho, uma análise da absorção de umidade aponta uma menor absorção para maiores temperaturas de conformação e maiores quantidades de RSU na mistura do compactado (Figura 44).

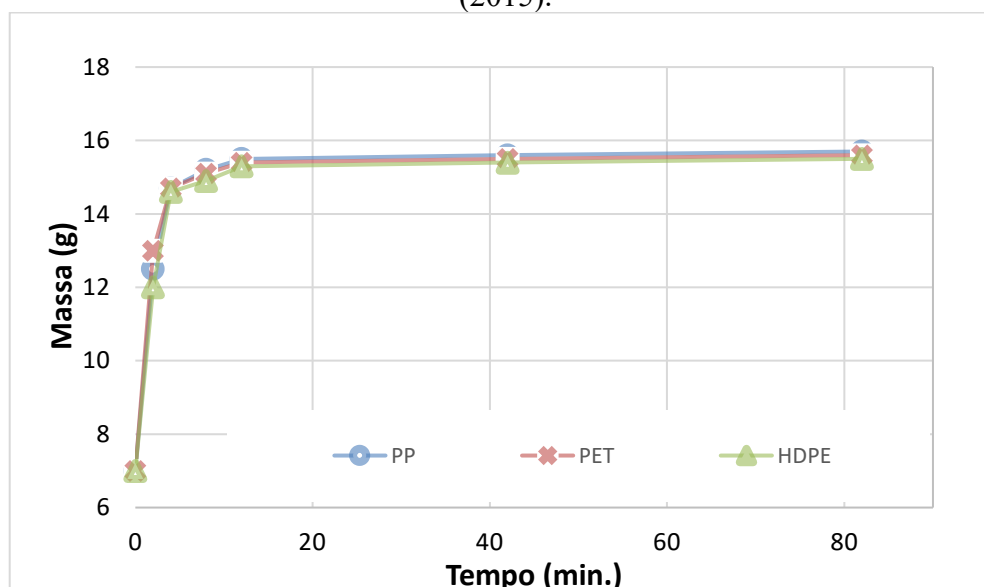
Figura 44: Teste de absorção de água.



Fonte: Autor (2022)

Os valores de absorção de umidade encontrados têm um comportamento muito próximo ao encontrado para outros trabalhos, em especial cita-se os compactados produzidos por Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015), com compactados de biomassa e plásticos – Figura 45.

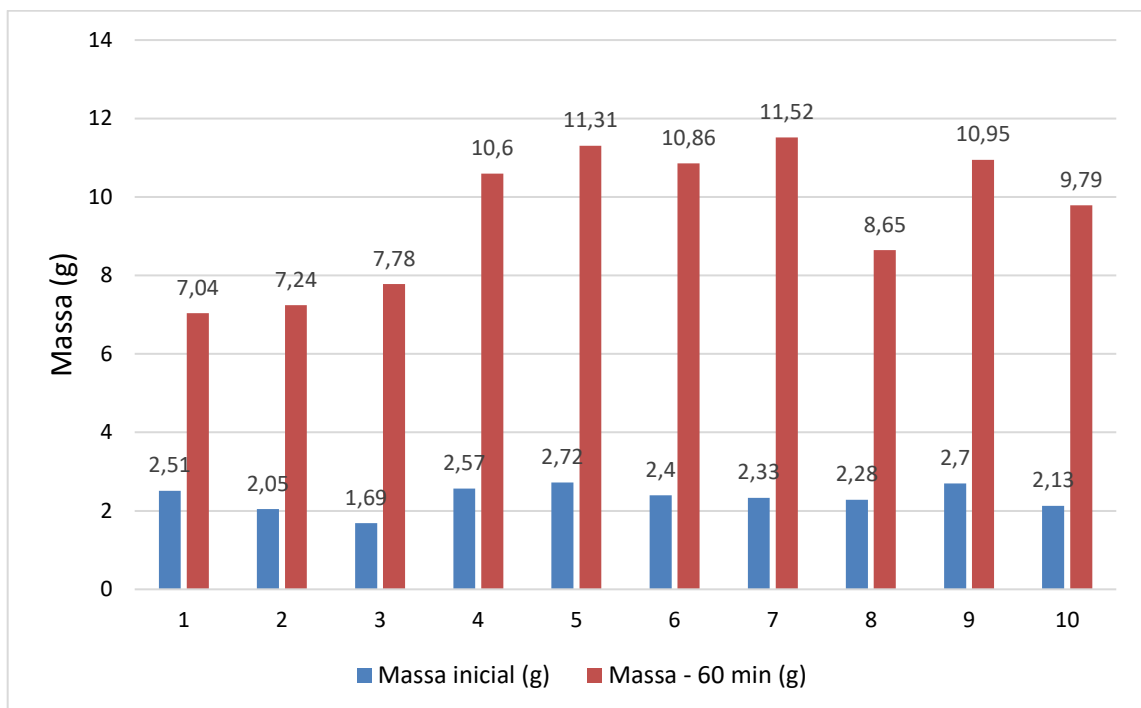
Figura 45: Exemplo de absorção de umidade no trabalho de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015).



Fonte: Adaptado de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015)

A Figura 46 ilustra o aumento de massa nos testes de absorção de umidade pelos compactados. Os resultados dos testes de absorção de umidade das amostras estão apresentados no Anexo R. Destaca-se que a massa inicial se apresenta diferente entre compactados devido ao uso das amostras antes submetidas ao teste de resistência (perda de massa). O maior valor médio de absorção para as três composições propostas (0, 10% ou 20% de RSU na mistura) foi maior para a temperatura de conformação de 100 °C. As maiores variações observadas foram para a temperatura de conformação de 140 °C.

Figura 46: Teste de absorção de umidade – após 60 minutos.

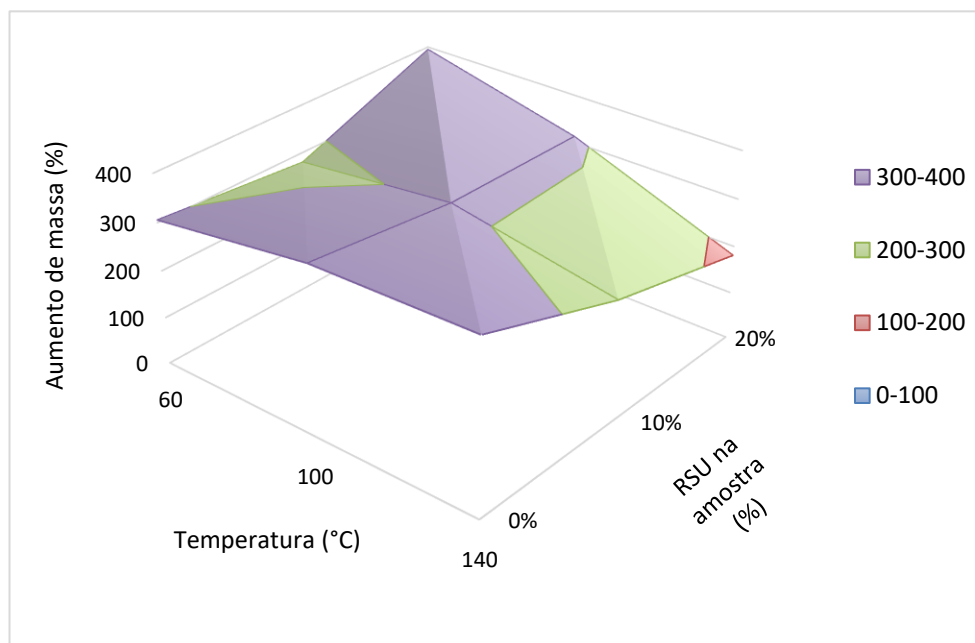


Nota: 1 - 140°C/20% RSU; 2 - 140°C/10% RSU; 3 - 140°C/0% RSU; 4 - 100°C/20% RSU; 5 - 100°C/10% RSU; 6 - 100°C/00% RSU; 7 - 60°C/20% RSU; 8 - 60°C/10% RSU; 9 - 60°C/0% RSU; 10 - 26°C/00% RSU.

Fonte: Autor (2021)

A Figura 47 ilustra a superfície de resposta para esse item analisado, onde percebe-se os melhores resultados à medida que se aumentou a temperatura de compactação e a quantidades de RSU na produção do compactado.

Figura 47: Aumento de massa após 60 minutos de absorção de água – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021)

Embora os estudos de Marrugo e colaboradores (2019) indicassem o uso de glicerol como positivo no aumento de resistência à umidade, a inserção desse componente em formato de cobertura, não representou ganhos significativos nos compactados em estudo. O resultado esperado de menor absorção não foi confirmado, apresentando comportamento semelhante aos demais compactados sem cobertura.

A absorção de umidade ambiente (sem submersão em água) não foi tratado neste trabalho. Contudo estima-se baixos índices de absorção devido pequenas variações de massa verificada na execução dos testes.

4.7 DENSIDADE

A densidade representa uma importante propriedade do combustível que pode ser relacionada a uma maior capacidade energética por menor volume ocupado.

Os resultados obtidos para os testes de determinação da densidade e expansão dos compactados foram organizados na Tabela 15. É possível observar que os maiores valores de densidade e menores índices de expansão são aqueles relacionados aos compactados na temperatura de 100 °C.

Uma média dos valores obtidos para densidade e expansão dos compactados, para quatro amostras testadas em cada condição (% RSU e temperatura), foi representada na Figura 48 (destaca-se os melhores resultados na temperatura de compactação de 100 °C).

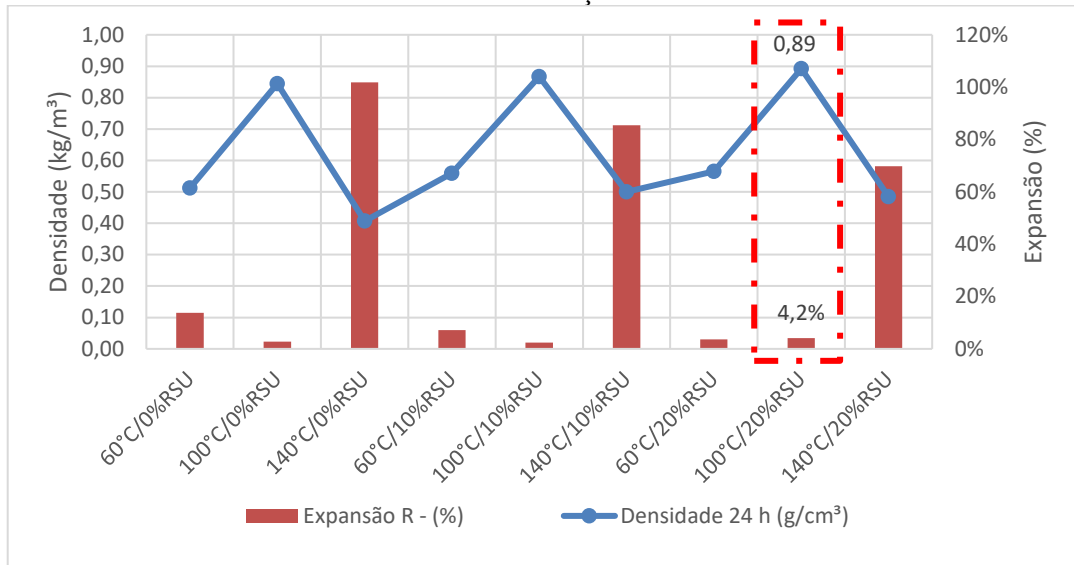
Tabela 15: Resultados de densidade e avaliação conforme metodologia adotada por Jewiarz et al. (2020) – valores aprovados.

Densidade (após 24 h)								
Amostra	Temp. (°C)	Massa (g)	Diâmetro (cm)	Altura inicial (cm)	Altura após 24h (cm)	Densidade 24 h (g/cm³)	Expansão R - (%)	Análise Expansão R (≤ 5%)
60°C/0%RSU	62,22 (± 2,38)	2,68 (± 0,077)	1,96 (± 0,024)	1,525 (± 0,037)	1,735 (± 0,047)	0,511 (± 0,030)	13,9 (± 4,97)	RECUSADO
100°C/0%RSU	99,62 (± 1,097)	2,46 (± 0,035)	1,915 (± 0,024)	0,985 (± 0,026)	1,0125 (± 0,026)	0,845 (± 0,026)	2,79 (± 1,54)	APROVADO
140°C/0%RSU	140,07 (± 0,05)	2,105 (± 0,07)	1,908 (± 0,01)	0,93 (± 0,119)	1,878 (± 0,403)	0,407 (± 0,088)	100,1 (± 18,5)	RECUSADO
Densidade (após 24 h)								
Amostra	Temp. (°C)	Massa (g)	Diâmetro (cm)	Altura inicial (cm)	Altura após 24 h (cm)	Densidade 24 h (g/cm³)	Expansão R - (%)	Análise Expansão R (≤ 5%)
60°C/10%RSU	60,53 (± 0,42)	2,825 (± 0,075)	1,95 (± 0,075)	1,58 (± 0,102)	1,692 (± 0,041)	0,559 (± 0,03)	7,3 (± 4,8)	PERMITIDO
100°C/10%RSU	100,17 (± 0,236)	2,715 (± 0,244)	1,915 (± 0,024)	1,063 (± 0,105)	1,0875 (± 0,094)	0,867 (± 0,028)	2,35 (± 1,39)	APROVADO
140°C/10%RSU	139,0 (± 1,155)	2,44 (± 0,357)	1,7 (± 0,407)	0,925 (± 0,070)	1,715 (± 0,299)	0,51 (± 0,098)	85,8 (± 34,1)	RECUSADO
Densidade (após 24 h)								
Biomassa (%)	Temp. (°C)	Massa (g)	Diâmetro (cm)	Altura inicial (cm)	Altura após 24 h (cm)	Densidade 24 h (g/cm³)	Expansão R - (%)	Análise Expansão R (≤ 5%)
60°C/20%RSU	60,85 (± 0,66)	2,84 (± 0,048)	1,95 (± 0,035)	1,628 (± 0,101)	1,687 (± 0,082)	0,565 (± 0,032)	3,8 (± 3,8)	APROVADO
100°C/20%RSU	100,15 (± 0,129)	2,56 (± 0,021)	1,912 (± 0,025)	0,96 (± 0,046)	1,00 (± 0,051)	0,894 (± 0,053)	4,2 (+ 3,43)	APROVADO
140°C/20%RSU	140,17 (± 0,359)	2,23 (± 0,04)	1,905 (± 0,013)	0,95 (± 0,029)	1,612 (± 0,247)	0,494 (± 0,078)	69,9 (± 27,3)	RECUSADO

Nota: Média (e desvio padrão) para cada item analisado;

Fonte: Autor (2021).

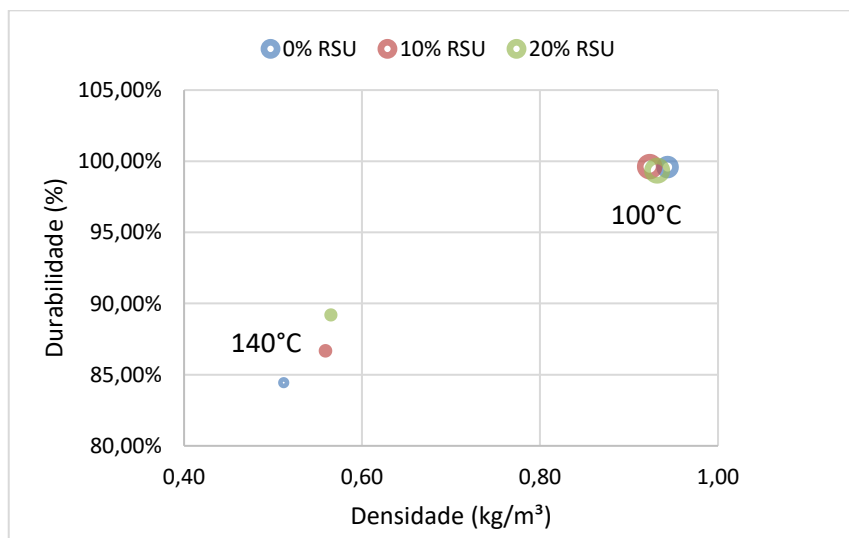
Figura 48: Resultados da determinação da densidade e da expansão após 24 horas da conformação.



Fonte: Autor (2021).

Relacionando-se durabilidade e densidade para diferentes temperaturas de compactação, verifica-se que a temperatura de 100 °C apresentou as melhores combinações, mesmo para diferentes percentuais de RSU nas misturas utilizadas. Os valores de durabilidade e densidade podem ser comparados para duas temperaturas de compactação 100 °C e 140 °C, conforme Figura 49.

Figura 49: Durabilidade e densidade para temperaturas de compactação 100 e 140 °C.



Fonte: Autor (2021).

Nos estudos de Alprakul et al. (2019) e Faizal et al. (2020) o aumento da quantidade de RSU no compactado também representou um aumento na densidade, sendo os maiores valores de densidade encontrados para as temperaturas de conformação de 75 °C e 100 °C. Outro ponto de interesse apontado é a maior densidade para o teor de umidade de 10% a 15%, independentemente do percentual de RSU e temperatura de conformação, colaborando para o uso dessa quantidade de umidade no presente trabalho.

O trabalho de Faizal e colaboradores (2016), aponta maiores densidades para maiores temperaturas de conformação. Uma explicação para esse evento pode estar no tipo de molde utilizado. Foi aplicado o aquecimento num molde fechado, que impede a perda de umidade da amostra. Fato que não foi verificado neste trabalho. Logo, admite-se que o aquecimento em temperaturas acima de 100°C favoreceu a redução da umidade das amostras para valores inferiores aos valores ideais (de 10% a 15%). A umidade abaixo dos valores recomendados impede a dissipação da lignina, favorecendo uma maior expansão e menor resistência mecânica em comparação às amostras compactadas na temperatura de 100 °C (Figura 51). Outro ponto importante é a biomassa utilizada, que difere em diferentes trabalhos e possui características de compactação diferentes.

Em relação à expansão dos compactados destaca-se que os maiores resultados estão ligados a temperaturas de conformação mais altas, onde a influência da perda de umidade (por evaporação no aquecimento) pode ter sido fundamental para a perda de ligação das partículas. A Figura 50 representa o processo de expansão de compactados, conforme adaptação do trabalho de Jewiarz et al. (2020).

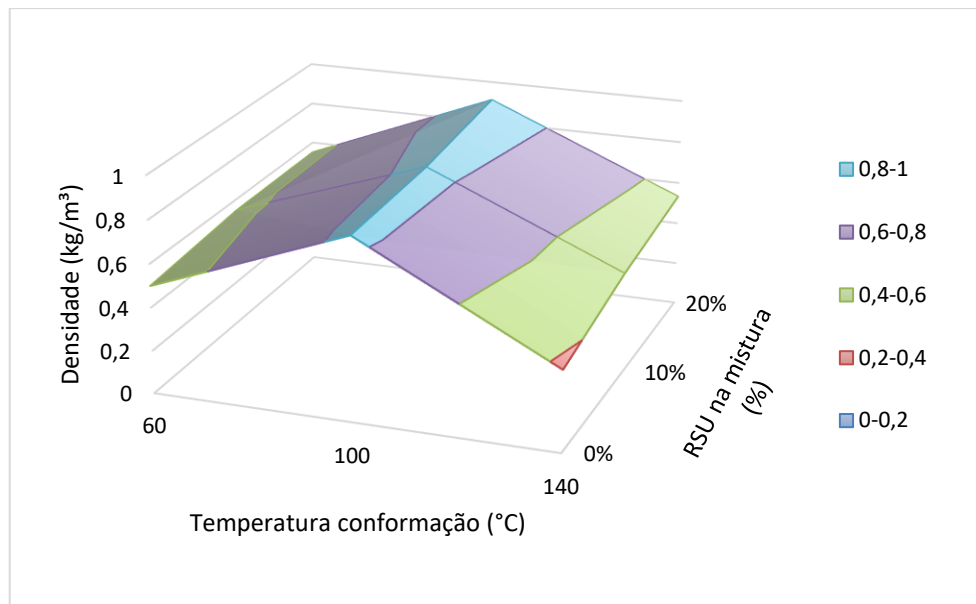
Figura 50: Método de análise para o teste de expansão.



Fonte: Adaptado de Jewiarz et al. (2020).

Neste trabalho os melhores valores de densidade foram observados na temperatura de compactação de 100 °C. Pode-se verificar claramente que, independentemente da quantidade de RSU adicionada, nessa temperatura os compactados sempre apresentaram resultados melhores, em comparação as demais temperaturas de conformação. Os dados podem ser verificados na superfície de resposta, conforme Figura 51.

Figura 51: Densidade dos compactados – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021).

4.8 TESTE MECÂNICO DE DURABILIDADE

A durabilidade mecânica é um parâmetro muito importante para a qualidade do combustível, em relação as condições de transporte e logística, além de servir para determinação de operações nas plantas.

Conforme já determinado, após o teste de queda, os compactados com perda de massa maiores que 10% (resistência menor que 90%) foram avaliados como “falhos” e os com menor perda de massa foram classificados como “aprovados” no teste de durabilidade (Tabela 16).

Tabela 16: Resultado dos testes de durabilidade dos compactados.

Massa após 4 quedas					Análise		Avaliação
Amostras	Antes (g)	Após (g)	Quebra?	Perda massa	Média (σ)	Resistência (%)	Falho?
60°C/0%RSU	2,66	2,38	SIM	10,53%	5,67% ($\pm 4,21\%$)	94,33	FALHO
60°C/0%RSU	2,57	2,48	SIM	3,50%			APROVADO
60°C/0%RSU	2,68	2,6	SIM	2,99%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,44	2,43	NÃO	0,41%	0,41% ($\pm 0,00\%$)	99,59%	APROVADO
100°C/0%RSU	2,43	2,42	NÃO	0,41%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,41	2,4	NÃO	0,41%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,23	1,7	SIM	23,77%	15,32% ($\pm 7,45\%$)	84,68%	FALHO
140°C/0%RSU	2,27	2,05	SIM	9,69%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,32	2,03	SIM	12,50%			FALHO
Amostras	Antes (g)	Após (g)	Quebra?	Perda massa	Média (σ)	Resistência (%)	Falho?
60°C/0%RSU	2,5	2,26	SIM	9,60%	7,68% ($\pm 3,50\%$)	92,32%	APROVADO
60°C/0%RSU	2,45	2,21	SIM	9,80%			APROVADO
60°C/0%RSU	2,47	2,38	SIM	3,64%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,72	2,71	NÃO	0,37%	0,38% ($\pm 0,02\%$)	99,62	APROVADO
100°C/0%RSU	2,48	2,47	NÃO	0,40%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,63	2,62	NÃO	0,38%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,48	2,29	SIM	7,66%	4,02% ($\pm 3,16\%$)	95,98%	APROVADO
140°C/0%RSU	2,53	2,47	SIM	2,37%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,46	2,41	SIM	2,03%			APROVADO
Amostras	Antes (g)	Após (g)	Quebra?	Perda massa	Média (σ)	Resistência (%)	Falho?
60°C/0%RSU	2,58	2,45	SIM	5,04%	6,84% ($\pm 3,96\%$)	93,16%	APROVADO
60°C/0%RSU	2,46	2,18	SIM	11,38%			FALHO
60°C/0%RSU	2,68	2,57	SIM	4,10%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,53	2,51	NÃO	0,79%	0,66% ($\pm 0,23\%$)	99,34%	APROVADO
100°C/0%RSU	2,55	2,53	NÃO	0,78%			APROVADO
100°C/0%RSU	2,53	2,52	NÃO	0,40%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,49	2,47	SIM	0,80%	2,24% ($\pm 1,57\%$)	97,76%	APROVADO
140°C/0%RSU	2,3	2,21	SIM	3,91%			APROVADO
140°C/0%RSU	2,49	2,44	SIM	2,01%			APROVADO
Amostras	Antes (g)	Após (g)	Quebra?	Perda massa	Média (σ)	Resistência (%)	Falho?
26°C/0%RSU	1,79	1,63	SIM	8,94%	10,66% ($\pm 2,32\%$)	89,34%	APROVADO
26°C/0%RSU	2,36	2,13	SIM	9,75%			APROVADO
26°C/0%RSU	1,58	1,37	SIM	13,29%			FALHO

Fonte: Autor (2021).

A Figura 52 ilustra a perda de material durante a execução dos testes teste de resistência mecânica dos compactados.

Figura 52: Perda de material nos testes de resistência.



Fonte: Autor (2021).

Assim como apresentado neste trabalho, no estudo de Auprakul et al. (2019) o aumento de RSU na mistura promoveu, em uma temperatura de conformação de 100 °C, um aumento de resistência mecânica. Isso pode estar diretamente relacionada a parte de plástico constituinte do RSU, o que aumenta a resistência do compactado (AUPRAKUL et al., 2019).

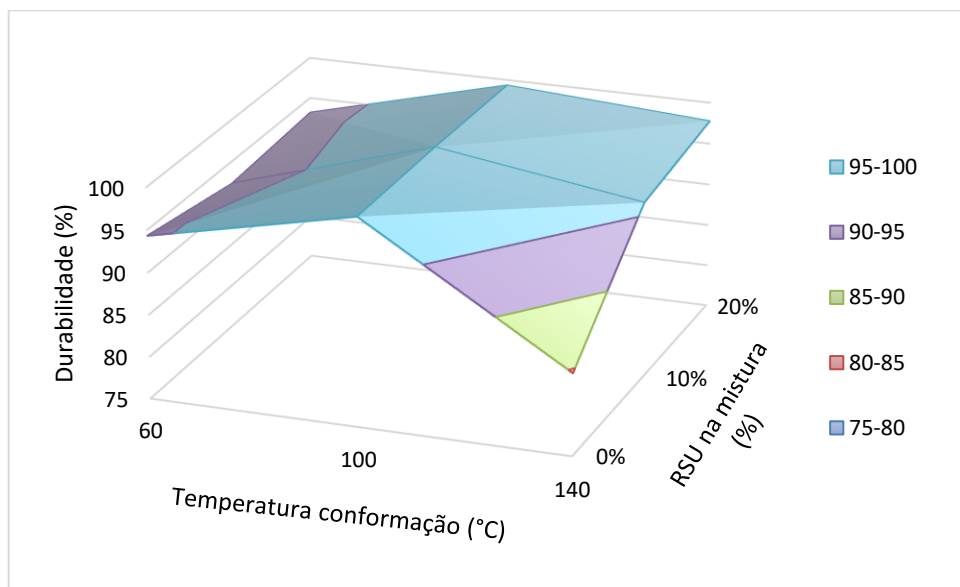
Relacionando a durabilidade dos compactados com a norma europeia CEN/TS 15210-1 (para biocombustíveis sólidos), percebe-se que os compactados devem ter durabilidade mecânica acima de 95% (CAMARGO et al., 2020). As misturas compactadas na temperatura de 100 °C atendem a essa determinação (superfície de resposta na Figura 53).

Relacionando-se os resultados obtidos com a literatura, chega-se às seguintes análises principais para a obtenção dos melhores resultados de durabilidade na compactação com temperatura de 100 °C:

- ✓ Tumuluru et al. (2010) informaram que o pré-aquecimento de biomassa para temperaturas de 100 a 130 °C, ajustando a umidade para 10% a 12%, ajuda a melhorar o grau de ligação. A umidade presente na biomassa facilita a gelatinização do amido, desnaturação da proteína e a solubilização das fibras durante o processo a extrusão, peletização ou briquetagem.
- ✓ Dam et al. (2004) relataram que a lignina exibe propriedades termoendurecíveis em temperaturas de trabalho menores que 140 °C e atua como resina intrínseca na produção de placas sem aglutinantes.

- ✓ Mani et al. (2003) observaram que a umidade na biomassa durante o processo de densificação atua como um aglutinante e fortalece a ligação por meio das forças de Van der Waal, o que aumenta a área de contato da partícula.
- ✓ Li e Liu (2000) pesquisaram a compactação e observaram que os péletes ou briquetes tendem a se tornar frágeis em apenas alguns dias se a umidade o conteúdo for inferior a 4%, devido à absorção de umidade do ambiente.
- ✓ Lehtikangas (1999) afirmaram que umidade de cerca de 8% a 15% na biomassa reduzirá a temperatura de amolecimento da lignina para 100 °C a 135 °C, com a plastificação de cadeias de moléculas.
- ✓ Granada et al. (2002) relataram que as propriedades adesivas da lignina termicamente amolecida contribuem consideravelmente para as características de resistência dos briquetes feitos de materiais lignocelulósicos.

Figura 53: Teste de durabilidade – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021).

4.9 TESTE DE INTEMPERISMO E UMIDADE

O teste foi realizado no período de 14 a 27 de agosto de 2021. De forma resumida, houve dias chuvosos e ensolarados, a temperatura média diária permaneceu entre 6 °C e 32 °C e a diferença entre o máximo e a temperatura mínima em cada dia estava entre 6 °C e 13 °C. O valor da umidade relativa variou de 60% a 95% com diferenças entre os valores máximos e

valores mínimos em 20% para um mesmo dia. A queda de chuva acumulada foi de, aproximadamente, 60 mm. Esses dados foram obtidos do site www.tempo.com (Anexo C).

Destaca-se que alguns briquetes se desintegraram depois dos períodos de chuva. Para esses casos, foi considerado a massa do material desintegrado, presente na contenção, na respectiva área original do compactado.

De forma diversa aos resultados de durabilidade, na resistência ao intemperismo os briquetes mais resistentes foram aqueles conformados na temperatura de 140 °C e com teor de RSU de 20%. Além disso, o teste de exposição ao tempo representou um grande desafio para a durabilidade dos briquetes em todas as formulações e temperaturas de conformação (Figura 54).

Figura 54: Teste de intemperismo com os compactados.

1- 140°C/20%; 2- 140°C/10%; 3- 140°C/0%; 4- 100°C/20%; 5- 100°C/10%; 6- 100°C/0%; 7- 60°C/20%; 8- 60°C/10%; 9- 60°C/0%; 10- 26°C/0%.



Fonte: Autor (2021).

Conforme já explanado, houve muita dificuldade em realizar as medições de massa e diâmetro da maioria dos briquetes devido a fragilidade das peças após o teste (perde de material e desmanche). Isso inclusive, resultou em perda considerável de massa do compactado, principalmente naqueles moldados na temperatura de 100 °C. Contudo, conseguiu-se realizar a medição, apresentando-se os resultados da Tabela 17. Destaca-se que foi necessário a coleta de toda massa residual no recipiente de teste para possibilitar a finalização das medições necessárias de massa final.

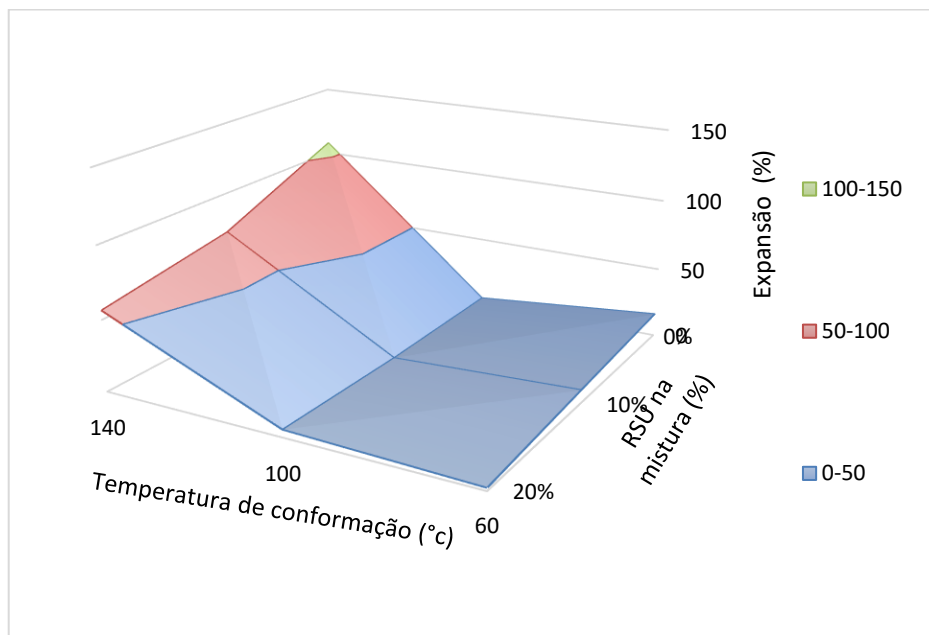
Tabela 17: Teste de intemperismo.

Tipo	Massa antes (g)	Massa após (g)	Diâmetro antes (cm)	Diâmetro após (cm)	Δh (%) (resistência a umidade)	Δm (%) (aumento de massa)
140°C/20%RSU	1,55	1,58	1,91	2,05	7,33%	1,94%
140°C/10%RSU	1,48	1,52	1,9	2,01	5,79%	2,70%
140°C/00%RSU	1,71	1,77	1,91	2,03	6,28%	3,51%
100°C/20%RSU	2,54	2,64	1,9	1,92	1,05%	3,94%
100°C/10%RSU	2,49	2,2	1,9	2	5,26%	-11,65%
100°C/00%RSU	2,43	2,3	1,91	1,82	-4,71%	-5,35%
60°C/20%RSU	1,99	2,1	1,96	2,2	12,24%	5,53%
60°C/10%RSU	1,86	1,96	1,95	2,02	3,59%	5,38%
60°C/00%RSU	1,67	1,83	1,96	2,1	7,14%	9,58%
26°C/00%RSU	1,4	1,48	1,96	2,12	8,16%	5,71%

Fonte: Autor (2021).

Outro ponto analisado foi a expansão dos compactados no teste de intemperismo. Os compactados mais resistentes ao intemperismo também apresentaram maior expansão linear, conforme pode ser evidenciado na superfície de resposta (Figura 55). Verifica-se pela superfície de resposta que as maiores expansões estão relacionadas a temperaturas de conformação mais altas e menores teores de RSU na mistura.

Figura 55: Teste de expansão no intemperismo – superfície de resposta.



Fonte: Autor (2021).

4.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para alguns testes realizados foram identificadas as seguintes relações estatísticas:

✓ Densidade:

Anova: houve variações significativas entre as amostras para os fatores aplicados. Porém não ocorreu interações significativas entre os fatores estudados (temperatura de compactação e teor de RSU na mistura).

Teste Tukey: ocorreu uma maior influência entre todos os tratamentos, do aumento da quantidade de RSU na mistura sobre a melhora da densidade do compactado na temperatura de 140 °C.

✓ Durabilidade:

Anova: houve variações significativas entre as amostras e os fatores aplicados. Porém não ocorreu interações significativas entre os fatores estudados (percentual de massa de RSU na mistura e temperatura de conformação).

Teste Tukey: ocorreu uma maior influência entre todos os tratamentos, da adição de RSU na mistura sobre a melhora da durabilidade do compactado na temperatura de 140 °C.

✓ Expansão após 24 horas:

Anova: houve variações significativas entre as amostras com relação a temperatura de conformação. Porém não ocorreu interações significativas entre os fatores estudados.

Teste Tukey: entre todos os tratamentos, aquele que promoveu uma maior influência sobre a melhora em relação à expansão (menor expansão) do compactado foi o aumento da quantidade de RSU na mistura na temperatura de 140 °C.

✓ Absorção de umidade:

Anova: houve variações muito significativas entre as amostras e principalmente em relação a temperatura de conformação. Porém não ocorreu interações significativas entre os fatores estudados.

Teste Tukey: Houve variações significativas entre amostras nas temperaturas de conformação de 60 °C e 140 °C, sendo que a temperatura de 100 °C não apresentou variações significativas. O aumento da quantidade de RSU na mistura não obteve mudanças expressivas nos resultados do teste, ou seja, sem interações significativas.

Os resultados das análises Anova e Tukey foram apresentados nos Anexos B e D.

4.11 EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A utilização de frações de rejeitos de RSU e de biomassa da região sul catarinense para a produção de combustíveis compactados oportunizam uma série de benefícios econômicos e ambientais. A produção de combustível foi analisada neste estudo como uma alternativa de energia primária, que pode ser utilizada nas usinas termelétricas e indústrias de cimento da região, sendo, contudo, válido para demais mercados, como as indústrias cerâmicas, por exemplo.

Realizando-se uma análise para a região sul de Santa Catarina, observou-se geração de resíduos local de aproximadamente 236.272,2 t no ano de 2020 (cidades da regional que remetem seus resíduos para os aterros sanitários situados nessa região). Desse total, 50,62% enquadram-se como material reciclável (média do sul do estado) e desses, 20% são rejeitos da triagem de recicláveis que poderiam ser utilizados para a produção de combustível (23.917,83 t). Entretanto, esse percentual de rejeitos da triagem reflete a situação na época de realização desse estudo e está diretamente relacionado às condições de coleta e de triagem dos RSU, podendo variar com a alteração delas.

Na mesma região, foi analisada a produção de biomassa da cultura de arroz, em torno de 999,75 mil t (proporcionalmente à área de plantio, tendo como referência a safra de Santa Catarina 2020/2021 – EPAGRI, 2021). Nessa análise, não se levou em consideração as outras biomassas passíveis de utilização na mesma região.

A partir desse quantitativo de resíduos na região é possível estimar a energia total obtida, tendo-se o poder calorífico inferior (PCI) dos elementos em questão (Tabela 12). O PCI para a mistura de biomassas de arroz e para a mistura de rejeitos de RSU considerados foram aqueles obtidos experimentalmente em calorímetro, 15,92 MJ/kg (considerando composição de biomassa com 15% de casca e 85% de palha) e 20,39 MJ/kg (considerando

composição de 78,6% de papel/papelão, 18,4% de plásticos moles e 3,0% de isopor), respectivamente. Nesse item, considera-se a possibilidade de uma possível redução desse valor quando da utilização total do rejeito da reciclagem devido a maior participação de material inerte e orgânico na composição do RSU. Mas, se forem adotados métodos de tratamento (separação) eficientes, o valor esperado pode ser aproximado.

Para um ano de produção de resíduos, considerando um aproveitamento de apenas 20% para o total de RSU e de 50% para a biomassa da rizicultura (considerando ainda as utilizações atuais como recomposição de solo e nas indústrias de beneficiamento), é possível obter uma quantidade energética de $4,82 \cdot 10^{11}$ kJ (134.019,45 MWh).

Uma outra análise seria a utilização dessa energia em uma usina termelétrica, considerando-se um fator de capacidade de 90% (tempo em funcionamento) e uma eficiência de conversão da usina de 30%. Para esses valores a energia obtida seria equivalente a 4,13 MWh (valor disponível em uma hora de geração).

Esse valor corresponde a cerca de 10% da potência de uma das usinas termelétricas instaladas nessa mesma região. Para ter-se uma ideia dessa capacidade, a energia é suficiente para abastecer 25.498 residências a um consumo médio de 162 kWh (EPE, 2019).

Tabela 18: Dados de geração de energia elétrica a partir de RSU e biomassa (região sul de Santa Catarina) em um ano de operação.

Dados	Valor (t)	Reciclável PERS, 2018	% de uso	Valor para utilização (ton)	PCI (kcal/kg)	Energia (kJ)	Energia (MWh)
Massa de RSU total na região sul de SC	236.272,20	50,62%	20%	23.917,3	4.712	$2,38 \cdot 10^{10}$	7.489,42
Massa de biomassa (arroz) total na região	999.750,00	—	50%	499.875,00	3.809	$4,50 \cdot 10^{11}$	126.530,03
Total	1.209.788,80	—	—	523.615,63	4.260	$4,82 \cdot 10^{11}$	134.019,45
Valor de produção horária para um ano de operação (fator de capacidade de 90 %; eficiência da usina de 30%)							4,13 MWh

Fonte: Autor (2021).

Na configuração de utilização proposta (referenciando-se a quantidade de resíduos disponível), o combustível seria composto por cerca de 5% de RSU e 95% de biomassa de arroz.

Contudo os dados podem ser otimizados, dependendo da maior geração de resíduos, maior aproveitamento, maior poder calorífico e do aumento da produção de RSU na região.

A mesma análise pode ser realizada para as demais regiões do estado de Santa Catarina, o que corresponderia ao potencial do estado. Lembra-se que a disponibilidade da biomassa sofre com a sazonalidade do plantio (colheita do arroz de fevereiro até abril), o que pode ser compensada nesses períodos pelo combustível original das plantas (carvão mineral) ou outras fontes de biomassa na região (madeira).

Outro ponto positivo dessa implantação seria a possibilidade de importação de resíduos de outras regiões do sul do estado para a área de instalação das termelétricas (Tubarão/SC), com a utilização da estrutura de ferrovias já instaladas. Atualmente, as ferrovias são utilizadas no transporte do carvão da região carbonífera para as termelétricas mencionadas. Além desse item, pode-se citar a possibilidade de importação de resíduos de outras áreas do país, utilizando-se da estrutura do porto instalado na cidade de Imbituba, que também conta com estrutura ferroviária até a área das termelétricas (Tubarão).

4.12 UTILIZAÇÃO DO MATERIAL EM CO-COMBUSTÃO EM USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO

Utilizando como exemplo a região sul de Santa Catarina, onde já se encontra instalado uma usina térmica a carvão mineral, a implementação de 10 anos de uma estratégia promissora de gestão de resíduos, com a utilização em co-combustão nessas unidades, permitiria como principais ganhos:

- ✓ A possibilidade de transformação total de 239.173,0 t de RSU em energia;
- ✓ A possibilidade de utilização total de 4.998.750,0 t de biomassa da rizicultura na conversão em energia;
- ✓ Economia de 227.967,1 t de combustível fóssil (carvão) no período considerado (10 anos), para um consumo específico de 0,7 kg/kWh e um fator de capacidade de 90% (valores típicos para as usinas a carvão).

O efeito econômico da implementação da estratégia acima mencionada pode ser dividido em duas partes:

- ✓ Receita - economia para a combustão através do uso de um combustível com capacidade para ser mais barato, elaborado com base em resíduos agrícolas e

municipais em vez de combustível fóssil (carvão ou óleo combustível), que são mais caros;

- ✓ Despesas - custos de construção de uma planta central para preparação de combustível e modernização do equipamento dos sistemas de manuseio de combustível para adaptação ao novo combustível.

O trabalho de Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020) analisou a co-combustão de carvão mineral e rejeitos (RSU - papelão, plástico, borracha e madeira - e óleo de turbina usado) em termos econômicos. Foram levados em consideração os dados de origem para a composição do combustível, os indicadores de desempenho para geração de energia, consumo e custo. O estudo sugere que é economicamente viável trocar uma usina movida a carvão mineral para co-combustão. Segundo Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020) os custos de construção de uma planta central para preparação de combustível derivado de resíduos e de modernização dos sistemas de alimentação de combustível para três unidades termelétricas são incomparavelmente menores do que os custos de aquisição de recursos energéticos para gerar a mesma quantidade de calor e eletricidade com o combustível original. Durante 25 anos de implantação da valorização de resíduos industriais e municipais, o efeito econômico poderia ser de 5,7-6,9 bilhões de dólares, dependendo da composição do combustível composto (GLUSHKOV, KUZNETSOV e PAUSHKINA, 2020).

O custo para construção de uma planta para preparação de combustível é um dos principais custos não recorrentes ao trocar usinas movidas a carvão por combustível composto. Leva-se em consideração o preço do equipamento de processo necessário para colocar em operação o novo sistema de preparação de combustível. Este item também inclui o custo de armazenamento dos componentes iniciais do combustível com a devida consideração do estoque necessário para cinco dias (GLUSHKOV, KUZNETSOV e PAUSHKINA, 2020).

A modernização do sistema de manuseio de combustível da usina também deve ser considerada nos custos. Usinas a carvão normalmente usam sistemas individuais de preparação de combustível com moinhos de bolas ou de rolos. O principal inconveniente é a preparação do sistema de alimentação do combustível para a nova mistura, que vai depender das suas características de escoamento e explosividade (COFIRING RDF WITH COAL FOR ENERGY, _____).

Com base nos resultados da análise de Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020), os custos de armazenamento e recuperação de cinzas e resíduos não leva a volumes crescentes de escória e resíduos de cinzas, o uso de biomassa inclusive reduz o volume de cinzas produzidas se analisarmos o percentual de cinzas do carvão usado (caso do carvão sul catarinense com 43% de cinzas). Portanto, esses custos não influenciam o efeito econômico analisado. Os

custos de remoção de cinzas representam 0,5% dos custos operacionais totais das usinas termelétricas a carvão.

As principais concentrações de emissões antrópicas da combustão do combustível composto não deverão exceder as características regulatórias correspondentes para os gases de combustão de caldeiras à carvão. Portanto, esses custos não influenciam o efeito econômico analisado, conforme Glushkov, Kuznetsov e Paushkina (2020). Contudo, a inclusão de CDR pode requerer modernização dos tratamentos usados ou novos tratamentos de gases não existentes nas plantas atuais.

Um balanço positivo pode ser o *gate fee* (taxa sobre o processamento de resíduo de uma instalação). Esse valor pode ser considerado como o valor pago atualmente para depositar os resíduos nos aterros sanitários.

Para uma análise financeira superficial, pode-se levar em consideração para implantação de co-combustão em uma usina da região os seguintes itens:

- ✓ Investimento inicial em uma fábrica de produtos derivados de resíduos com as características informadas nesse trabalho. Essa parte do investimento pode ser terceirizada ou adotar uma parceria de longo prazo, contudo a produção anexa à usina trará economia no transporte e gastos com eletricidade na produção do combustível;
- ✓ Necessidade de área coberta para armazenamento do combustível auxiliar, o que deve entrar nos cálculos iniciais de investimento;
- ✓ Adaptação no sistema de alimentação de combustível com a inserção do CDR. O valor depende das características do combustível e do nível instrumentação a ser implementada. Esse valor também depende muito da quantidade de aplicação de CDR na planta. Madanayake et al. (2017), apontaram grande variação no custo de implantação de co-combustão, desde USD 43,7/t (para 10% de substituição ao carvão mineral) até USD 129,7/t (para 100% de utilização de biomassa);
- ✓ Ganhos com possíveis abatimentos em geração de CO₂ (gases de efeito estufa) pela utilização do combustível alternativo;
- ✓ Ganhos imensuráveis em relação à percepção do empreendimento na comunidade pela aplicação de um combustível em parte renovável.

5 CONCLUSÃO

A utilização de resíduos para a produção de energia parece ser uma evolução iminente e com grandes colaborações para a sociedade. A pesquisa apontou que a geração de resíduos sólidos urbanos e biomassa da rizicultura na região sul catarinense apresenta quantidades significativas para produção de energia térmica ou elétrica, carecendo desenvolver uma logística para recolha, separação e utilização.

As caracterizações das amostras de biomassa da rizicultura e de rejeitos da etapa de triagem de RSU mostraram que esses materiais têm boas propriedades para utilização como combustível, principalmente em termos energéticos. Logo, há expectativa que o combustível obtido neste trabalho, além de ser um vetor para proporcionar aproveitamento dos RSU e geração de renda para a região sul catarinense, também será favorável na área energética. Além disso, a compactação dos resíduos em formato de combustível pode ser uma boa alternativa para o sistema de gerenciamento desses componentes a nível local, sobretudo para a utilização das sobras dos processos de reciclagem, o que também pode favorecer essa prática.

Dentre os testes realizados no desenvolvimento do combustível compactado, destaque para os melhores resultados obtidos na temperatura de conformação de 100 °C e com um percentual de 20% de RSU na mistura, tanto para a maior densidade, quanto para a maior durabilidade das peças. Outro ponto de destaque foi a não necessidade de uso de aglutinante, o que reduz o custo de produção. Em contrapartida, os compactados apresentaram baixa resistência à umidade, deteriorando-se após algum tempo de contato com a água e esse é um ponto de atenção e necessita de aprofundamento dos estudos.

Além da possível aplicação como fonte de energia térmica na própria fabricação do CDR e nas indústrias da região, pode ser uma fonte para co-combustão com carvão mineral nas usinas termelétricas nela instaladas, servindo como ferramenta para a transição energética a longo prazo dada a importância da indústria do carvão mineral no sul catarinense. A análise preliminar da co-combustão de RSU e carvão mineral a partir dos resultados deste trabalho se mostrou favorável a essa utilização, com potencial incidência de menor índices de emissões e favorecimento de menor uso de combustíveis fósseis.

Espera-se que as informações obtidas com a pesquisa colaborem de alguma forma com os itens apontados acima, mas, principalmente, sirva de subsídio para outros estudos e que o assunto ganhe relevância no cenário regional, seja no setor público, como no privado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na produção do presente trabalho surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. Na sequência, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objeto de futura investigação:

- ✓ Utilizar aglutinantes nas composições, de forma a obter-se misturas com maior durabilidade e resistência à umidade;
- ✓ Avaliar a influência da granulometria na qualidade dos compactados;
- ✓ Realizar testes com maior percentual de RSU e avaliar o resultado para percentuais de 30% e 40% na mistura;
- ✓ Outro ponto importante para testes é a adição de hidróxido de cálcio. Uma dosagem em torno de 10% seria um bom teste para o combustível alternativo. Além de ser um ligante, esse produto auxilia na redução da concentração de SO_x nos gases de combustão, com a combinação de cálcio com o enxofre;
- ✓ Trabalhar os aspectos econômicos (busca de baixo custo de matéria-prima e mão-de-obra voltada para ganhos econômicos);
- ✓ Avaliar o ciclo de vida do combustível derivado de resíduos em uso para co-combustão em uma usina termelétrica;
- ✓ Avaliar os impactos ambientais e sociais relacionados com o uso do combustível derivado de resíduos e no desenvolvimento de novos produtos com potencial energético;
- ✓ Realizar análise energética da produção dos combustíveis derivados de resíduos compactados e de sua influência no ciclo de vida e na geração de gases de efeito estufa;
- ✓ Realizar testes de combustão individual e combinado com carvão mineral catarinense.
- ✓ Estudar os custos e investimentos para produção do combustível derivado de resíduos compactado (implantação de uma unidade de produção e retorno de investimentos);
- ✓ Avaliar a densificação de combinação de resíduos agroindustriais como biomassa e glicerol com intuito de aumentar a densidade energética da biomassa para condições de uso semelhantes a carvões minerais de baixa classificação.

REFERÊNCIAS

ABELHA, Pedro Miguel Rosa de Jesus. **EMISSÕES GASOSAS DURANTE A CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO COM RESÍDUOS**. Tese de Doutorado. Lisboa, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira nº NBR 10.004, de 31 de maio de 2004**. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira nº NBR 6457, 1986**. Amostras de solos — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira nº NBR 16.849, de 10 de fevereiro de 2020**. Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos — Requisitos. Rio de Janeiro, RJ.

ABRELPE (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**: Abrelpe. 15. ed. São Paulo, 2019. 64 p. Disponível em: www.abrelpe.org.br. Acesso em: 17 jul. 2020.

ABREN. **Recuperação Energética de Resíduos: geração de energia limpa, uma alternativa ao fim dos lixões**. 2020. Disponível em: <https://abren.org.br/2020/09/09/recuperacao-energetica-de-residuos-geracao-de-energia-limpa-uma-alternativa-ao-fim-dos-lixoes-estadao/>, acesso em 12 de set. 2020.

AGOSTINETTO, Dirceu et al. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**. 32. 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26364595_Potencial_de_emissao_de_metano_em_lavouras_de_arroz_irrigado, acesso em 20 de mar. 2021.

AGRIMEC. As Melhores alternativas para o manejo da palha de arroz. Disponível em: <https://agrimec.com.br/as-melhores-alternativas-para-o-manejo-da-palha-doarroz/#:~:text=Ou%20seja%2C%20para%20cada%20tonelada,fica%20uma%20tonelada%20de%20palha,/>, acesso em 12 de set. 2020.

ASTM D5142. **Métodos de teste padrão para análise aproximada da amostra de análise de carvão e coque por procedimentos instrumentais:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

ASTM D5373-13. **Métodos de Teste Padrão para Determinação de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio em Amostras de Análise de Carvão e Carbono em Amostras de Análise de Carvão e Coque:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D5865-13. **Método de teste padrão para valor calórico bruto de carvão e coque:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013b.

ASTM D7582-15. **Métodos de teste padrão para análise próxima de carvão e coque por análise macro termogravimétrica:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D4239-18. **Método de teste padrão para enxofre na amostra de análise de carvão e coque usando combustão em forno tubular de alta temperatura:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D240-19: **Método de Teste Padrão para Calor de Combustão de Combustíveis de Hidrocarbonetos Líquidos por Calorímetro de Bomba:** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ATLAS DO PLÁSTICO: FATOS E NÚMEROS SOBRE O MUNDO DOS POLÍMEROS SINTÉTICOS / organização Marcelo Montenegro, Manoela Vianna, Daisy Bispo Teles. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2020.

AUPRAKUL, Unchana; PROMWUNGKWA, Anucha; TIPPAYAWONG, Nakorn; CHAIKLANGMUANG, Suparin. Factors affecting properties of fuel pellets from compaction of mixed biomass and waste plastics Agric EngInt: CIGR **Journal Open access at <http://www.cigrjournal.org>** Vol. 21, No. 3 123. 2019.

BAKKER et al. **Rice straw and Wheat straw - Potential feedstocks for the Biobased Economy.** Wageningen UR, Food & Biobased Research. 2013.

BESEN, G.R.; FRACALANZA, A.P. Desafios para a Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Municipais no Brasil. *DISP The Planning Review*, 52: 2, 45-52, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02513625.2016.1195583>. Acesso em: 13 abr. 2020.

BEST PRACTICE BROCHURE: CO-FIRING OF BIOMASS (Main Report). Report No. COAL R287 DTI/Pub URN 05/1160. 2005.

BOUMANCHAR I, Chhiti Y, M’Hamdi Alaoui FE, Elkhouchi M, Sahibed-dine A, Bentiss F, et al. Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes. *Waste Manag* 2019.

BRASIL, **Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010**, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 13 abr. 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União: Poder Legislativo. 135. ed. Brasília, DF, 16 jul. 2020. Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 17 set. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

BUTTON, Sérgio Tonini. **Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados**. Campinas. 2012, disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila2012.pdf>, acesso em 20 de junho de 2021.

CAI, Junmeng, et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 76. 2017.

CAMARGO et al. "Caracterização química, física e térmica de péletes de madeira de diferentes composições." **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 24 (2020): e11. Rede. 28 de setembro de 2021.

CEMBRANEL, Adir Silvério et al. Gravimetric composition and the causes of waste generation in the screening of municipal recyclable waste. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 36217-36239, abril de 2021.

CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 6. ed. New York: Mcgraw-hill, 2006.

CETRULO, T.B. et al. Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618328142?casa_token=IYeY7DLhvF4AAAAA:9QPJw-zW7JVbMM3M2VtPPDNIsqOODbnRHf1ocL1Z8WyESWgzeyarTHXH1XdWGNqDsGdwLvE. Acesso em: 10 set. 2020.

CHEN Heng et al. An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant, **Energy**, Volume 194, 2020a.

CHEN, X.; GENG, Y.; FUJITA, T.. An overview of municipal solid waste management in China. **Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 716–724, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.011>. Acesso em 20 set. 2020.

CHYANG, Chien-Song. An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal. **Waste Management**, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20022739/>. Acesso em 20 set. 2020.

COFIRING RDF WITH COAL FOR ENERGY. Disponível em: <https://p2infohouse.org/ref/11/10516/cofire.html>, acesso em 31/12/2020.

CONSONNI S, Silva P. Off-design performance of integrated waste-to-energy, combined cycle plants. **Appl Therm Eng.** volume 27:712e21. 2007.

DA SILVA Filho, VF, Batistella, L., Alves, JL, da Silva, JC, Althoff, CA, Moreira, RD, & José, HJ. Avaliação das emissões gasosas da conversão térmica de uma mistura de resíduos sólidos urbanos e cavacos de madeira em um gerador de calor em escala piloto. **Renewable Energy**. 2019.

DAM, et al. “Process for Production of High Density/High Performance Binderless Boards from Whole Coconut Husk—Part 1: Lignin as Intrinsic Thermosetting Binder Resin,” **Industrial Crops and Products**, 19(3), 207–216, 2004.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) 51731. **Teste de combustíveis sólidos: Madeira comprimida não tratada - Requisitos e testes**. 1996.

EDO, Mar et al. 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, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.062>.

EMBRAPA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78690/1/DOC-13.pdf>. Acesso em: 04 set. 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. **Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions**. 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/criteria-definition-solid-waste-and-solid-and-hazardous-wasteexclusions>. Acesso em: 03 nov. 2020.

EPAGRI. **Safra catarinense de arroz se mantém estável em 2021, com produtividade superior no Sul do Estado**. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2021/07/23/safra-catarinense-de-arroz-se-mantem-estavel-em-2021-com-productividade-superior-no-sul-do-estado/>, acesso em 20 de dezembro de 2021.

EPE. **Consumo de energia elétrica, 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 18 de mar. 2022.

ESTADÃO, **Recuperação energética de resíduos geração de energia limpa uma alternativa ao fim dos lixões, 2020**. Disponível em:

<https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/recuperacao-energetica-de-residuos-geracao-de-energia-limpa-uma-alternativa-ao-fim-dos-lixoes/>. Acesso em 10 set. 2020.

EUROSTAT. **Municipal waste statistics. 2017.** Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Municipal_waste_statistics#Further_Eurostat_information. Acesso em: 30 de set. 2019.

FAIZAL, H.M et al. Development of palm biomass briquettes with polyethylene plastic waste addition. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)** 78: 9–2, 2016, 69–75. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/850>. Acesso em 20 set. 2020.

FALEMARA, Babajide Charles et al. Performance Evaluation of the Physical and Combustion Properties of Briquettes Produced from Agro-Wastes and Wood Residues. **Recycling**, 2018.

FRUERGAARD e ASTRUP, Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective, **Waste Management**, Volume 31, Issue 3, 2011.

GARRIDO, M.A; CONESA, J.A; GARCIA, M.D. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic. **Wastes Energies**. 2017, 10, 850.

GLUSHKOV, D., KUZNETSOV, G. e PAUSHKINA, K.. Trocando Usina Térmica a Carvão para Combustível Composto para Recuperação de Resíduos Industriais e Municipais: Características de Combustão, Emissões e Efeito Econômico. **Energies** 13: 259. 2020.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

GOMES, Grazielly dos Santos. **Avaliação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos e proposição de melhorias, Laguna, Santa Catarina, Brasil.** Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Osório – RS, 2020.

GONÇALVES J. Evaristo. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de eucalyptus grandis**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP, 2010.

GREINERT, Andrzej; MRÓWCZYNSKA, Maria; SZEFRNER, Wojciech. The Use of Waste Biomass from the Wood Industry and Municipal Sources for Energy Production. **Sustainability**. V11. 2019.

GRANADA et al. “Fuel Lignocellulosic Briquettes, Die Design, and Products Study,” **Renewable Energy**, 27, 561–573, 2002.

GUADAGNIN, Mario Ricardo; SELAU, Cassandra Costa; CADORIN, Sabrina Baesso. Gestão e Gerenciamento de resíduos sólidos no município de Criciúma/SC. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 24, 2018.

GUERRINI, A. et al. Assessing efficiency drivers in municipal solid waste collection services through a non-parametric method. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 431–441, 2017.

GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. **Waste Management**, Volume 35, pp. 283-292, 2015.

HASAN, Belkiz e AHSANT, Aidin. **A comparison between two different methods of combustion; Grate-fired and Fluidized bed, applied to a CHP-plant with MSW as fuel**. KTH School of Industrial Engineering and Management. Energy Technology. Estocolmo. 2015

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Agência IBGE - Notícias**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/27535-desemprego-sobe-para-12-2-e-atinge-12-9-milhoes-de-pessoas-no-1-trimestre>. Acesso em 15 set. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: agenda 2030**. Agenda 2030. 2020. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br>. Acesso em: 10 set. 2020.

INFIESTA et al. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *J Environ Manage.* 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719301586?casa_token=oasIuLVHypAAAAAA:oNDebCbP0Vfn6E3ci0gqT-uJcd-u7S4N5p5OZ41ZNKDguYc01RTa8vtygYyITGZQzool4iI. Acesso em 16 set. 2020.

IQBAL, M.; NADEEM, A e BUTT, M. Fuel pellets derived from municipal solid waste residues and rice husks. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 54 (4), 329-338. 2020. Disponível em: <https://www.banglajol.info/index.php/BJSIR/article/view/44567>. Acesso em 16 dez. 2020.

ISO 17247. **Coal – Ultimate Analysis**: ISO, 2005.

JAWORSKI, TJ; MALGORZATA, Kajda-Szcześniak, M. Estudo sobre a similaridade dos parâmetros da biomassa e da combustão de combustível residual sólido para as necessidades de engenharia de energia térmica. *Sustentabilidade*. 2020, 12 , 7894.

JEWIARZ, Marcin et al. Parameters affecting RDF-based pellet quality. *Energies*, v. 13, n. 4, p. 910, 2020.

KADAM, K.; FORREST, F.; JACOBSON, J. Rice straw as a lignocellulosic resource: Collection, processing, transportation, and environmental aspects. *Biomass and Bioenergy*, v. 18, n. 5, p. 369-389,2000.

KALINCI, Y.; D., I. **Waste Energy Management**. [S.l: s.n.], 2018. v. 5–5.

KAMI, Eduardo Choozo Arenas. **Análise Termoeconômica de Sistema Híbrido Solar Térmico Integrado à Unidade de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019. p. 240. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

KAZIMIERZ et al. Uso de resíduos em produção de péletes para fins energéticos. 2020. *Renewable Energy*. Elsevier, vol. 145 (C), páginas 997-1003.

KLEVESTON, Fábio. **Metodologia de Avaliação do Potencial de Resíduos Agrícolas para Conversão Energética**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

KOPPEJAN, J. Database of Biomass Cofiring initiatives - version 2.0. **IEA Bioenergy** - Task 32; 2017.

KUMAR, SAMADDER, A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste, **Waste Management**, Volume 69, 2017.

LEHTIKANGAS, P., 1999, “**Quality Properties of Fuel Pellets from Forest Biomass**,” Licentiate Thesis, Department of Forest Management and Products, Report 4, Uppsala, 1999.

LIMA. M. A.; NEVES, M.C.; HERMES, L.C.; PESSOA. M.C.P.Y. **Estimativa da emissão de metano proveniente da cultura irrigada de arroz no Estado de Santa Catarina**. EMBRAPA-CNPMA. 1997.

LI, Y. and H. LIU, 2000, “High Pressure Densification of Wood Residues to Form an Upgraded Fuel,” **Biomass and Bioenergy**, 19, 177–186, 2000.

LIU, Huimin et al. A review on current status of the co-combustion technology of organic solid waste (OSW) and coal in China. **Energy Fuels**. 2020. 34, 15448–15487.

MA, W.; HOFFMANN, G.; SCHIRMER, M.; CHEN, G.; Rotter, V.S. Chlorine characterization and thermal behavior in MSW and RDF. **J Hazard Mater**, 178 (2010), pp. 489-498

MADANAYAKE, Buddhike Neminda et al. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. **Fuel Processing Technology**. Volume 159. 2017.

MAIA, Bianca Goularte de Oliveira. **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BANANICULTURA E DA RIZICULTURA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES**. Univille. 2013.

MAHAJANI, Sanjay M., ARORA, Amit, PRADHAN, Priyabrata. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. **Fuel Processing Technology**, Volume 181. 2018.

MANI, S., L. G. TABIL, and S. SOKHANSANJ, 2002, **Compaction Characteristics of Some Biomass Grinds**, 2002 Meeting, CSAE/SCGR Program, Saskatoon, Saskatchewan, July 14–17, 2002.

MANI, S., L. G. TABIL, and S. SOKHANSANJ, 2003, “An Overview of Compaction of Biomass Grinds,” **Powder Handling & Processing**, 15(3), 160–168, 2003.

MARTINHO, Pires A., G., Rodrigues S., Gomes MI. Barreiras Técnicas e Desafios Socioeconômicos. **Springer**. 2019.

MCDUGALL, F. et al. Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory. 2. ed. Oxford: **Blackwell Science Ltd.**, 2001. 520 p.

MIYAKE, Raphael Guardini. **Análise termodinâmica e de transferência de calor em um gerador de vapor a carvão pulverizado e palha de arroz**. Florianópolis, SC, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6 ed, John Wiley & Sons, 2005.

MORATORIO, D.; ROCCO, I.; CASTELLI, LEMEZ M. **Conversión de residuos sólidos urbanos en energía**. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, v. 10, p. 115– 126. ago. 2012. Disponível em: <https://www.mendeley.com/catalogue/conversi%C3%B3nresiduos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-energ%C3%ADa/>. Acesso em: 12 de set. 2020.

MORAIS, M. et al. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: **An. 6. Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER- GD)**, UNICAMP: Campinas-SP, 2006.

MORTELE, Diovane Freire. **Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 2011.

MUAZU R.I.; STEGEMANN, J.A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. **J. Fuel Processing Technology** 133, 2015.

MUKESH Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Hongyu Chen, Quan Wang, Meijing Wang, Sanjeev Kumar Awasthi, Jiao Li, Tao Liu, Ashok Pandey, Zengqiang Zhang, Chapter 3 - Global Status of Waste-to-Energy Technology, Editor(s): Sunil Kumar, Rakesh Kumar, Ashok Pandey, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, **Elsevier**, 2019

MÜNSTER, Marie; LUND, Henrik. Comparing Waste-to-Energy Technologies by applying energy system analysis. *Waste Management*.v. 30, p. 1251-1263, 2010. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002748>. Acesso em: 14 dez. 2020.

NHUCHHEN, D. R.; SALAM, P. A. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: a new approach. **Fuel**, v. 99, p. 55-63, 2012.

NIDHI, C.; SHARMA, B.; SINGH, PK. Energy Value in Biomass and Plastic Components Of Municipal Solid Waste. **International Journal of Science and Technology**, v. 3, n. 2, pág. 80-92, 18 de setembro de 2017.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Wood Energy: Principles and Applications. [S.l.: s.n.], 2002.

OBERNBERGER, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. **Biomass and Bioenergy** 30, 973–982, 2006.

ONU. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 09 abr. 2021.

OPER. Como interpretar uma análise de variância (Anova). Disponível em: <https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-analise-de-variancia-anova/>, acesso em 12 de set. 2021.

OZYUGURAN, A.; AKTURK, A.; YAMAN, S. Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. **Fuel**, v. 214, p. 640-646, 2018.

PALERMO, Giuseppe Cernicchiaro; GOMES, Ana Paula Pereira. **Tratamento e gestão de resíduos** [livro eletrônico]. Rio de Janeiro: UVA, 2017.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PERS, Adenilso Biasus. Secretário de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. **Plano estadual de resíduos sólidos de Santa Catarina**: contrato administrativo n. 012/2016. 2. ed. Florianópolis, 2018. 400 p. (2). Disponível em: <http://www.perssc.premiereng.com.br/documentos>. Acesso em: 15 set. 2020.

POLI, Dora de Castro Rubio et al. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Waste Management**.v. 8, n. 8, p. 09-31, 2013. Revista de ciências Exatas e Tecnologia. Disponível em: <https://revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/2217>. Acesso em: 28 dez. 2020.

POMA C; VERDA V; CONSONNI S. Design and performance evaluation of a wasteto-energy plant integrated with a combined cycle. **Energy**. 2010; volume 35:786e93.

RABIER, F.; Temmerman, M.; Böhm, T.; Hartmann, H.; Daugbjerg Jensen, P.; Rathbauer, J.; Carrasco, J.; Fernández, M. Particle density determination of pellets and briquettes. **Biomass Bioenergy** 2006, 30, 954–963.

REZAEI, Hamid et al. Pelletization of Refuse-Derived Fuel with Varying Compositions of Plastic, Paper, Organic and Wood. **Sustainability**, v. 12, n. 11, pág. 4645, 2020.

ROSSI, C.R. **Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos na Região da AMESC**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Araranguá. Engenharia de Energia. 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/128062>. Acesso em 18 set. 2020.

SILVA, E.R. (2015) **Estimativa do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos por Diferentes Rotas de Tratamento**. 2015. 202f. Tese (Doutorado em Energia) – Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC, Santo André

SING, ChinYee et al. An experimental investigation on the handling and storage properties of biomass fuel briquettes made from oil palm mill residues. **Journal of Applied Sciences**, v. 12, n. 24, p. 2621-2625, 2012.

SNIS-RS, 2021 - **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**, disponível em: www.snis.gov.br, acesso em 20 de janeiro de 2021.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011

SOMPLAK, et al. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. **Clean Techn Environ Policy** 16, 1275–1286 (2014).

SONG, Bing et al. Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics. **Fuel**. Volume 283. 2020.

SOUTO, G. D. B.; POVINELLI, J. Resíduos sólidos. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (Org.). **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Ed. Elsevier Editora Ltda., 2013. p. 565 – 588.

SRIVASTAVA, Gopal et al. Physicochemical and thermal characterization of nonedible oilseed residual waste as sustainable solid biofuel. **Waste Management**. Volume 34. 2014.

TEMPO EM TUBARÃO/SC – Disponível em: <https://www.tempo.com/tubarao.htm>, acesso em 14 de agosto de 2021;

THEENERGYST, **Simec says plastic waste pellets looking good for Uskmouth power station**. 2020. Disponível em: <https://theenergyst.com/simec-says-plastic-waste-pellets-looking-good-for-uskmouth-power-station/>. Acesso em 10 set. 2020.

TUMULURU, J.S.; WRINGHT, C.T; KENNY, K.I.; HESS, J.R. A review on Biomass Densification for Energy Applications. **Conference Paper**. 2011.

UE, **Diretiva 2009/28/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de abril de 2009 sobre a promoção do uso de energia de fontes renováveis e que altera e revoga as Diretivas 2001/77/EC e 2003/30/EC**. 2009. Disponível em: <https://eur->

lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN, acesso em 18 mar. 2022.

VALOR ECONÔMICO. **Taxa de desemprego sobe para 14,1% na segunda semana de setembro, aponta IBGE.** 2020. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2020/10/02/taxa-de-desemprego-sobe-a-141percent-aponta-ibge.ghtml>. Acesso em 01 de out. 2020.

VASSILEV, Stanislav V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, Volume 89, 2010.

VICZEK, S.A. et al. Origins and carriers of Sb, As, Cd, Cl, Cr, Co, Pb, Hg, and Ni in mixed solid waste – A literature-based evaluation. **Waste Management**, [S.L.], v. 103, p. 87-112, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.009>.

VIEIRA, K.S. **Análise da eficiência do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Caruaru, Brasil. 2019. 103 p.

VIRMOND, E. **Utilização de resíduos agroindustriais com fonte alternativa de energia.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil. 2011. 272 p.

VIRMOND, E.; DE SENA, R.F.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C.A.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management (Elmsford)**, v. 32, p. 1952-1961, 2012.

VISHWAKARMA, A; KULSHRESTHA, M; KULSHRESHTHA, M. Performance assessment of urban municipal solid waste management services in an Indian state. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 41, n. 3, p. 275–284, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961324292&partnerID=40&md5=eb1581b13dbb6effe60b760c4ee2ba9c>. Acesso em 01 set. 2020.


WILLIAMS, A. et al. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, **Progress in Energy and Combustion Science**, Volume 38, 2012.

ZAFARI, A., & KIANMEHR, M. Effect of raw material properties and die geometry on the density of biomass pellets from composted municipal solid waste. **BioResources**, 7 (4), 4704-4714. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_4_4704_Zafari_Kianmehr_Raw_Material_Die_Geometry_Pellets_Compost. Acesso em 01 set. 2020.

ZHANG S, Lin X, Chen Z, Li X, Jiang X, Yan J. Influence on gaseous pollutants emissions and fly ash characteristics from co-combustion of municipal solid waste and coal by a drop tube furnace. **Waste Manag.** 2018; Volume 81:33e40.

ZHANG, Yimin & Mckechnie, Jon & Cormier, Denis & Lyng, Robert & Mabee, Warren & Ogino, Akifumi & Maclean, Heather. Life Cycle Emissions and Cost of Producing Electricity from Coal, Natural Gas, and Wood Pellets in Ontario, Canada. **Environmental science & technology**. 2010. Volume 44. 538-44. 10.1021/es902555a.

ANEXO A – Planilha de calibração do conjunto de medição de temperatura da amostra.

 SERVIÇOS DE ENGENHARIA		FR-MN-REJL-0004		USINA	N.ºS
				UTLA	
				ATM	Revisão: 03
					Data: 19/10/2018
TAG: Display Temperatura		DESCRIÇÃO: Conjunto Display Temperatura Novus 0 ~ 200°C com Termopar Tipo J			
Varição do Sinal (%)	0	25	50	75	100
Escala (Un. Eng.) (°C)	0	50	100	150	200
Sinal Aplicado (°C)	0	50	100	150	200
Sinal Saída Esperado (°C)	0	50	100	150	200
(°C)	-0,20	49,70	99,70	149,80	199,70
(°C)	-0,20	49,80	99,80	149,90	199,80
Antes do Ajuste (°C)	-0,20	49,70	99,70	149,80	199,80
Display	-0,20	49,80	99,80	149,80	199,70
Necessita Ajuste?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não		<i>Critério de aceitação: ± 2% F.E.</i>		
(mA)	0	50	100	150	200
(mA)	0	50	100	150	200
Após o Ajuste (mA)	0	50	100	150	200
Display	0	50	100	150	200
OBSERVAÇÕES		CONFIGURAÇÕES			
PADRÃO DE ENTRADA MULTICALIBRADOR FLUXE 725 EGG036278		PADRÃO DE SAÍDA MULTICALIBRADOR FLUXE 725 EGG036278		LOCALIZAÇÃO	
DATA		22/04/2021		EXECUTANTE	
				DAVIM/CHRISTIAN	

ANEXO B – Resultados da análise estatística dos resultados dos testes aplicados aos compactados - ANOVA

Densidade do compactado:

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra (%RSU)	0,039798	2	0,019899	13,25072	0,00028979	3,554557146
Colunas (temp.)	0,87069	2	0,435345	289,8936	2,0349E-14	3,554557146
Interações	0,012311	4	0,003078	2,049498	0,13022226	2,927744173
Dentro	0,027031	18	0,001502			
Total	0,949831	26				

Nota: *SQ* – variação entre amostras; *gl* – graus de liberdade; *MQ* -variação dentro da amostra; *F* – estatística teste; *Valor P* – probabilidade de diferenças; *F crítico* – estatística de teste – valor crítico.

Durabilidade do compactado:

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra (%RSU)	76,16012	2	38,08006	3,014624	0,07426616	3,554557146
Colunas (temp.)	252,8174	2	126,4087	10,0072	0,00119652	3,554557146
Interações	232,0144	4	58,00359	4,591879	0,00988482	2,927744173
Dentro	227,372	18	12,63178			
Total	788,3639	26				

Nota: *SQ* – variação entre amostras; *gl* – graus de liberdade; *MQ* -variação dentro da amostra; *F* – estatística teste; *Valor P* – probabilidade de diferenças; *F crítico* – estatística de teste – valor crítico.

Expansão do Compactado:

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra (%RSU)	2124,927	2	1062,463	12,84346	0,00034221	3,554557146
Colunas (temp.)	31328,13	2	15664,06	189,3531	8,1514E-13	3,554557146
Interações	2378,633	4	594,6583	7,188456	0,00121436	2,927744173
Dentro	1489,033	18	82,72407			
Total	37320,72	26				

Nota: *SQ* – variação entre amostras; *gl* – graus de liberdade; *MQ* -variação dentro da amostra; *F* – estatística teste; *Valor P* – probabilidade de diferenças; *F crítico* – estatística de teste – valor crítico.

Absorção de umidade:

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra (%RSU)	15861,89	2	7930,947	1,47E+31	1,188E-272	3,554557146
Colunas (temp.)	23072,34	2	11536,17	2,14E+31	4,078E-274	3,554557146
Interações	58035,1	4	14508,78	2,69E+31	1,011E-276	2,927744173
Dentro	9,69E-27	18	5,39E-28			
Total	96969,33	26				

Nota: *SQ* – variação entre amostras; *gl* – graus de liberdade; *MQ* -variação dentro da amostra; *F* – estatística teste; *Valor P* – probabilidade de diferenças; *F crítico* – estatística de teste – valor crítico.

ANEXO C – Tempo na cidade de Tubarão/ SC durante o teste de intemperismo

Sábado 14 AGO.	 90% 1.4 mm	20°/14°	 19 - 41 km/h	>	Sábado 21 AGO.		32°/19°	 16 - 44 km/h	>
Domingo 15 AGO.	 60% 2 mm	23°/13°	 9 - 25 km/h	>	Domingo 22 AGO.	 70% 8.1 mm	25°/11°	 21 - 48 km/h	>
Segunda 16 AGO.		18°/12°	 8 - 21 km/h	>	Segunda 23 AGO.	 70% 1.4 mm	14°/9°	 17 - 40 km/h	>
Terça 17 AGO.		25°/15°	 8 - 23 km/h	>	Terça 24 AGO.		12°/8°	 22 - 47 km/h	>
Quarta 18 AGO.		25°/16°	 10 - 25 km/h	>	Quarta 25 AGO.		14°/6°	 23 - 54 km/h	>
Quinta 19 AGO.		31°/17°	 13 - 30 km/h	>	Quinta 26 AGO.		15°/6°	 15 - 41 km/h	>
Sexta 20 AGO.		31°/19°	 14 - 32 km/h	>	Sexta 27 AGO.		16°/10°	 14 - 31 km/h	>

Fonte: www.tempo.com (2021).

ANEXO D – Resultados da análise estatística dos resultados dos testes aplicados aos compactados - Teste Tukey:

Durabilidade do compactado:

Teste Tukey	DMS	7,4076		
Temp. 60°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	Análise
0% RSU-10%RSU	94,3267	92,32	2,0067	NS
0% RSU-20%RSU	94,3267	93,16	1,1667	NS
10% RSU-20%RSU	92,32	93,16	0,84	NS
Temp. 100°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	99,59	99,617	0,0267	NS
0% RSU-20%RSU	99,59	99,343	0,2467	NS
10% RSU-20%RSU	99,6167	99,343	0,2733	NS
Temp. 140°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	84,68	95,98	11,3	S
0% RSU-20%RSU	84,68	97,76	13,08	S
10% RSU-20%RSU	95,98	97,76	1,78	NS

Nota: *DMS* – diferença mínima significativa; *NS* – variação não significativa; *S* – variação significativa.

Densidade:

Teste Tukey	DMS		0,0808	
Temp. 60°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	Análise
0% RSU-10%RSU	0,49933	0,5467	0,0473	NS
0% RSU-20%RSU	0,49933	0,5503	0,051	NS
10% RSU-20%RSU	0,54667	0,5503	0,00367	NS
Temp. 100°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	0,842	0,857	0,015	NS
0% RSU-20%RSU	0,842	0,912	0,07	NS
10% RSU-20%RSU	0,857	0,912	0,055	NS
Temp. 140°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	0,372	0,4687	0,0967	S
0% RSU-20%RSU	0,372	0,5323	0,1603	S
10% RSU-20%RSU	0,46867	0,5323	0,06367	NS

Nota: *DMS* – diferença mínima significativa; *NS* – variação não significativa; *S* – variação significativa.

Expansão:

Teste Tukey	DMS		18,957	
Temp. 60°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	Análise
0% RSU-10%RSU	16,1333	9,2	6,933	NS
0% RSU-20%RSU	16,1333	2	14,133	NS
10% RSU-20%RSU	9,2	2	7,2	NS
Temp. 100°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	3,4	3	0,4	NS
0% RSU-20%RSU	3,4	5,2333	1,833	NS
10% RSU-20%RSU	3	5,2333	2,233	NS
Temp. 140°C	Média 1	Média 2	Módulo da média	
0% RSU-10%RSU	107,833	71,667	36,167	S
0% RSU-20%RSU	107,833	56,333	51,5	S
10% RSU-20%RSU	71,6667	56,333	15,333	NS

Nota: *DMS* – diferença mínima significativa; *NS* – variação não significativa; *S* – variação significativa.

ANEXO E – Laudo com resultados da análise elementar e do poder calorífico superior - PCS



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Melier, 73, Universitária, Criciúma/SC - CEP: 88.805-380
 Fone: 048 3431.7516 Fone/Fax: 048 3431.7515 E-mail: laec@satc.edu.br

Página 1 de 1

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 3833/2021

Descrição da Amostra: BOMASSA
Tipo da Amostra: BIOMASSA
Cliente: ADILSON GERALDO MACHADO
Endereço do Cliente: RUA ENIO MAHOEL MAZARIO
Contato: ADILSON GERALDO MACHADO
Contratante: ADILSON GERALDO MACHADO
Data Recebimento: 17/08/2021

AMOSTRAGENS
Método: X
Local da Coleta: X
Data: -
Representatividade: X
Condições Climáticas Observações: X

Amostra	Análise/Ensaio	Método / Referência	Resultado	Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UNIDADE DE HIGROSCÓPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	4,48 %	18/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Análise	4874 Cal/g	19/08/2021	Temperatura(C): 24,50
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO-064 Rev:13/ASTM D 4239/18 Et Método A	0,03 %	19/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 Rev: 2	47,40 %	25/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 Rev: 2	6,91 %	25/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 Rev: 2	0,40 %	25/08/2021	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

TATIANI MALGARISE BROLESI
 Signatário Autorizado

PRISCILA DOS REIS MARTINS
 Responsável Técnico
 CRO 13201027 - 13ª Região

Documento finalizado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 25/08/2021, às 11:55:54.

Documento emitido às: 11:52:15 do dia 25/08/2021 (hora e data de Brasília).
 Código de controle do documento: b025_af31_2db3_0f8c
 Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC, no endereço validade.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Fozcoai Meier, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fax/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 3834/2021

Descrição da Amostra: MISTURA DE BIOMASSA (85% PALHA + 15% CASCA DE ARROZ)
Tipo da Amostra: BIOMASSA
Cliente: ADILSON GERALDO MACHADO
Endereço do Cliente: RUA ENO MANOEL NAZÁRIO
Contato: ADILSON GERALDO MACHADO
Contratante: ADILSON GERALDO MACHADO
Data Recebimento: 17/08/2021

AMOSTRAGENS
Método: X
Local da Coleta: X
Data: -
Representatividade: X
Condições Climáticas Observações: X

Amostra	Análise/Ensaio	Método / Referência	Resultado	Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	10,29 %	18/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Análise	3957 Cal/g	19/08/2021	Temperatura(C): 24,50
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO-064 Rev:13/ASTM D 4239/18 E: Método A	0,06 %	19/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 Rev: 2	38,25 %	25/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 Rev: 2	5,62 %	25/08/2021	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 Rev: 2	0,83 %	25/08/2021	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".



 TATIANI MALGARISE BROLESI
 Signatário Autorizado


 PRISCILA DOS REIS MARTINS
 Responsável Técnico
 CRQ 13201027 - 13ª Região

Documento finalizado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 25/08/2021, às 11:56:31.

Documento emitido às: 11:52:53 do dia 25/08/2021 (hora e data de Brasília).
 Código de controle do documento: c739_3aba_404b_0232
 Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço validade.satc.edu.br.

ANEXO F – Laudo com resultados da análise do teor de cloreto

 Associação Brasileira de Cimento Portland	ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO	1/2
	RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 138054	
Interessado: Adilson Geraldo Machado		
Endereço: Rua Erio Manoel Nazario ,85 CEP 88708-307		
Referência: Orçamento 93191		

Amostra nº: 240925 a 240926	Data de entrada: 23.08.21
Material declarado: Concreto	
Período de realização dos ensaios: 23.08.21 a 13.09.21	
Objetivo: Determinação do teor de cloreto	

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta o resultado do ensaio de determinação do teor de cloreto, referente as amostras, coletadas e enviadas pelo Interessado. As amostras receberam as seguintes identificações:

ABCP	Interessado
240925	Am 01 RSU
240926	Am 02 Biomassa

2. MÉTODOS DE ENSAIO

PO-GT-3012 Determinação do teor de cloreto por ion seletivo



2/2

Relatório de ensaio nº 138054

3. RESULTADOS

O ensaio foi realizado nas amostras como recebida. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

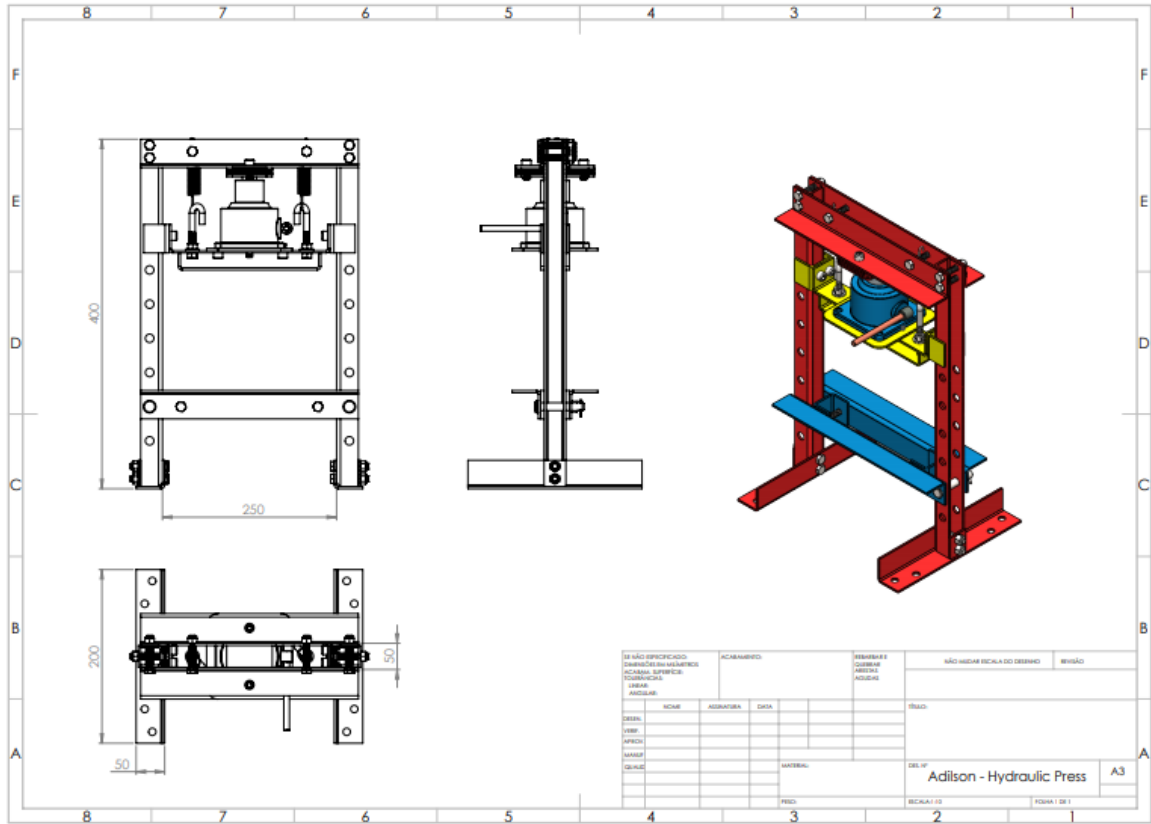
TABELA 1 – Resultado da determinação de cloretos

Identificação da amostra		Teor (%)
ABCP	Interessado	
240925	Am 01 RSU	0,19
240926	Am 02 Biomassa	0,53

São Paulo, 13 de Setembro de 2021

Quím. Francisco M.B. Planelles
Supervisor de Ensaios Químicos

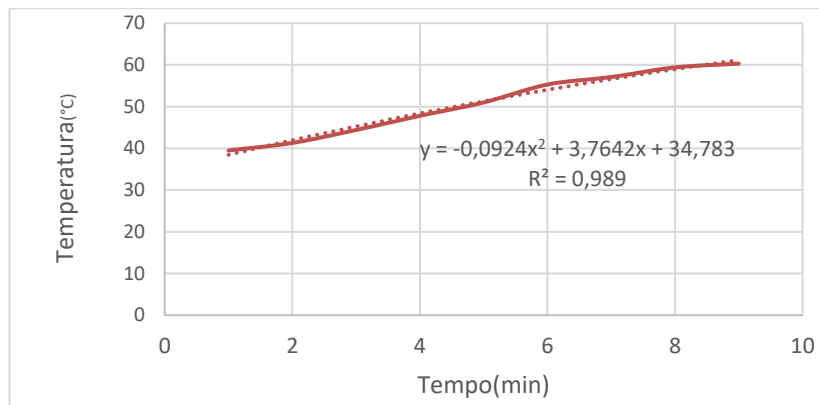
ANEXO G – Projeto para montagem da prensa hidráulica



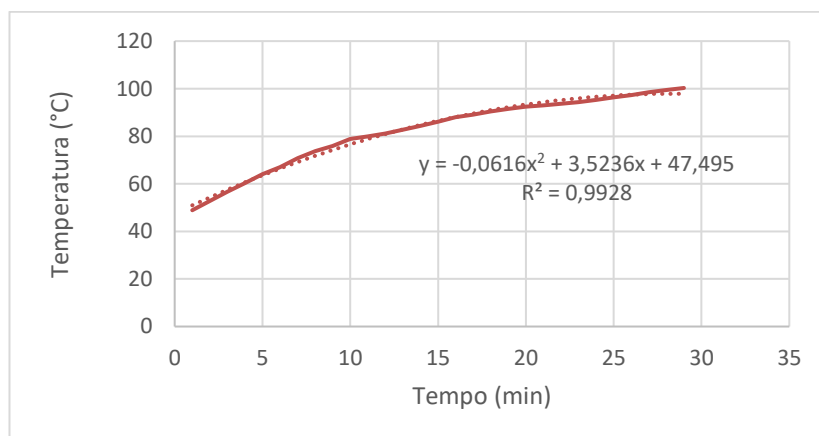
Fonte: Autor (2021).

ANEXO H – Monitoramento da taxa de elevação de temperatura das amostras

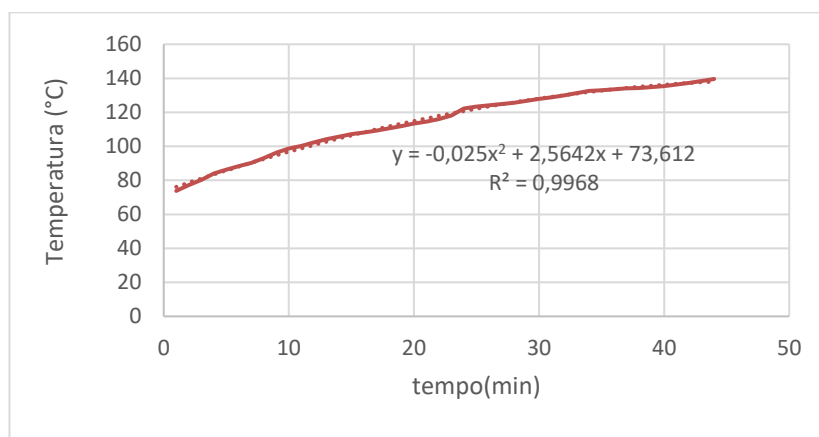
Perfil de elevação temperatura da amostra até 60°C



Perfil de elevação temperatura da amostra até 100°C

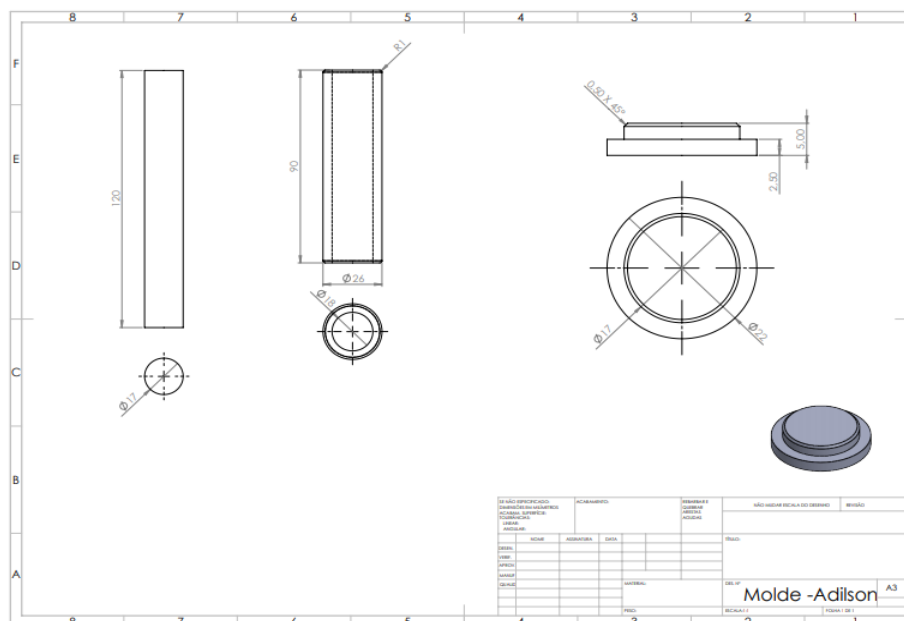


Perfil de elevação temperatura da amostra até 140°C



Fonte: Autor (2021).

ANEXO I – Projeto para montagem do molde utilizado para conformar o CDR



Fonte: Autor (2021).

ANEXO J – Resultados da análise da amostra de casca de arroz do sul de Santa Catarina – Tubarão

Biomassa	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Casca arroz 1	10,11	66,66	12,15	11,08	3397,48	14,20	12,70
Casca arroz 2	10,07	67,23	12,02	10,68	3385,16	14,15	12,65
Casca arroz 3	10,13	67,08	12,03	10,76	3386,31	14,15	12,65
Casca arroz 4	10,18	66,26	11,89	11,67	3432,93	14,35	12,84
Casca arroz 5	10,13	65,81	12,04	12,02	3445,46	14,40	12,90
Média	10,12 (±0,04)	66,61 (±0,59)	12,03 (±0,09)	11,24 (±0,58)	3409,47 (±27,91)	14,25 (±0,12)	12,75 (±0,12)

Nota: Base úmida; Média (e desvio padrão) ao final de cada item analisado

Fonte: Autor (2021).

ANEXO K – Resultados da análise da amostra de palha de arroz do sul de Santa Catarina – Tubarão

Biomassa	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Palha arroz 1	10,95	66,09	17,58	5,38	2884,41	12,06	10,53
Palha arroz 2	10,9	66,08	17,7	5,32	2878,75	12,03	10,51
Palha arroz 3	10,84	66,01	17,6	5,55	2895,76	12,10	10,58
Palha arroz 4	10,94	65,36	17,57	6,13	2920,61	12,21	10,68
Média	10,91 (±0,05)	65,89 (±0,35)	17,61 (±0,06)	5,60 (±0,37)	2894,88 (±18,55)	12,10 (±0,08)	10,58 (±0,08)

Nota: Base úmida; Média (e desvio padrão) ao final de cada item analisado

Fonte: Autor (2021).

ANEXO L – Resultados do teste de absorção de água nos compactados após 60 minutos - média (e desvio padrão)

Amostra/ Tempo	140°C / 20% RSU	140°C/ 10% RSU	140°C/ 0% RSU	100°C/ 20% RSU	100°C/ 10% RSU	100°C/ 0% RSU	60°C/ 20% RSU	60°C/ 10% RSU	60°C/ 0% RSU	26°C/ 0% RSU
0	2,505 (0,01)	2,285 (0,33)	2,055 (0,51)	2,56 (0,01)	2,65 (0,10)	2,445 (0,06)	2,37 (0,06)	2,35 (0,099)	2,675 (0,03)	2,24 (0,15)
2	3,405 (0,01)	3,13 (0,45)	2,795 (0,70)	4,205 (0,01)	4,85 (0,07)	4,38 (0,11)	5,1 (0,14)	3,63 (0,17)	4,355 (0,06)	3,595 (0,25)
4	6,87 (0,03)	7,715 (1,12)	8,71 (1,68)	8,4 (0,01)	8,755 (0,36)	8,685 (0,23)	8,755 (0,07)	8,235 (0,40)	8,42 (0,12)	9,38 (0,66)
8	6,925 (0,04)	7,875 (1,17)	9,175 (2,15)	9,755 (0,63)	9,535 (0,43)	10,16 (0,19)	10,25 (0,08)	8,6 (0,41)	9,665 (0,15)	9,605 (0,70)
15	6,975 (0,04)	7,94 (1,17)	9,26 (2,18)	10,3 (0,14)	10,36 (0,48)	10,67 (0,18)	11,15 (0,08)	8,8 (0,42)	10,25 (0,16)	10,03 (0,73)
30	7,01 (0,14)	8,015 (1,18)	9,3 (2,19)	10,85 (0,49)	10,75 (0,49)	10,795 (0,16)	11,385 (0,09)	8,915 (0,47)	10,68 (0,17)	10,17 (0,74)
60	7,03 (0,14)	8,08 (1,19)	9,35 (2,22)	11 (0,56)	10,95 (0,50)	10,945 (0,12)	11,585 (0,09)	8,975 (0,46)	10,84 (0,15)	10,32 (0,75)

Fonte: Autor.

ANEXO M – Resultados da análise do teor de umidade das amostras de RSU – coleta 1

Amostra	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Teor de umidade (%) BU
Papel / papelão	2,842	2,682	5,63%
Plástico duro	1,35	1,288	4,59%
Plástico macio	0,666	0,644	3,30%
Matéria orgânica	0,916	0,846	7,64%
Borracha	0,172	0,172	0,00%
Couro	0	0	0,00%
Isopor	0,108	0,106	1,85%
Madeira	0,072	0,068	5,56%
Trapos	1,298	1,204	7,24%
Metais	0,118	0,118	0,00%
Vidro	0,396	0,396	0,00%
Fraldas	0	0	0,00%
Espuma	0,048	0,046	4,17%
Outros	1,958	1,946	0,61%
TOTAL	9,944	9,516	4,30%

Fonte: Autor (2021).

ANEXO N – Resultados da análise do teor de umidade das amostras de RSU – coleta 2

Amostra	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Teor de umidade (%) BU
Papel / papelão	2,922	2,746	6,02%
Plástico duro	1,732	1,65	4,73%
Plástico macio	2,262	2,186	3,36%
Matéria orgânica	0,622	0,57	8,36%
Borracha	0,3	0,299	0,33%
Couro	0	0	0,00%
Isopor	0,418	0,404	3,35%
Madeira	0,52	0,506	2,69%
Trapos	0,762	0,722	5,25%
Metais	0,182	0,179	1,65%
Vidro	2,03	2	1,48%
Fraldas	0	0	0,00%
Espuma	0,03	0,029	3,33%
Outros	1,942	1,9	2,16%
TOTAL	13,722	13,191	3,87%

Fonte: Autor (2021).

ANEXO O – Resultados da análise do teor de umidade das amostras de RSU – coleta 3

Amostra	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Teor de umidade (%) BU
Papel / papelão	2,504	2,386	4,71%
Plástico duro	0,484	0,476	1,65%
Plástico macio	1,766	1,54	12,80%
Matéria orgânica	1,192	1,12	6,04%
Borracha	0	0	0,00%
Couro	0	0	0,00%
Isopor	0,25	0,226	9,60%
Madeira	0,212	0,188	11,32%
Trapos	0,822	0,778	5,35%
Metais	0,226	0,224	0,88%
Vidro	1,838	1,82	0,98%
Fraldas	0	0	0,00%
Espuma	0	0	0,00%
Outros	1,29	1,222	5,27%
TOTAL	10,584	9,98	5,71%

Fonte: Autor (2021).

ANEXO P– Resultados da análise imediata das frações das amostras de RSU utilizadas e da estimativa de PCS e PCI

RSU	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Plástico 1	3,5	76,09	5,56	14,85	4079,74	17,05	15,71
Plástico 2	2,17	76,6	4,81	16,42	4232,82	17,69	16,38
Plástico 3	1,08	77,51	3,74	17,67	4374,36	18,28	17,00
Média	2,25 (+1,21)	76,73 (+0,72)	4,70 (+0,91)	16,31 (+1,41)	4228,97 (+147,35)	17,68 (+0,62)	16,36 (+0,65)

RSU	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinza (%)s	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Papel/papelão 1	8,69	75,59	5,96	9,76	3630,20	15,17	13,70
Papel/papelão 2	8,7	74,99	6,71	9,6	3592,93	15,02	13,55
Papel/papelão 3	8,7	74,99	6,71	9,6	3592,93	15,02	13,55
Média	8,70 (+0,01)	75,19 (+0,35)	6,46 (+0,43)	9,65 (+0,09)	3605,35 (+21,52)	15,07 (+0,09)	13,60 (+0,09)

RSU	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Isopor 1	0,96	78,44	2,52	18,08	4445,93	18,58	17,30
Isopor 2	1,57	78,27	2,63	17,53	4392,91	18,36	17,06
Isopor 3	1,98	77,82	3,19	17,01	4331,16	18,10	16,80
Média	1,50 (+0,51)	78,18 (+0,32)	2,78 (+0,36)	17,54 (+0,54)	4390,00 (+57,44)	18,35 (+0,24)	17,05 (+0,25)

Mistura RSU	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Mistura (Am. 1)	7,55	76,2	5,37	10,88	3748,68	15,67	14,23
Mistura (Am. 2)	8,09	75,43	6,17	10,31	3670,33	15,34	13,89
Mistura (Am. 3)	7,68	75,6	5,95	10,77	3715,95	15,53	14,09
Média	7,77 (+0,28)	75,74 (+0,40)	5,83 (+0,41)	10,65 (+0,30)	3711,65 (+39,35)	15,51 (+0,10)	14,07 (+0,10)

Nota: Base úmida; Média (e desvio padrão) ao final de cada item analisado.

Fonte: Autor (2021).

ANEXO Q – Resultado da análise imediata das misturas 1, 2 e 3

Nome	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Mistura 1	9,10	67,78	15,84	7,28
Mistura 1	8,95	67,41	16,31	7,33
Mistura 1	9,82	67,15	16,56	6,47
Mistura 1	9,17	67,53	16,14	7,16
Mistura 1	9,33	66,66	17,20	6,81
Mistura 1	9,19	67,16	16,61	7,04
Média	9,26 (\pm 0,30)	67,28 (\pm 0,39)	16,44 (\pm 0,46)	7,02 (\pm 0,33)
Mistura 2	7,51	70,48	12,48	9,53
Mistura 2	8,75	67,75	15,87	7,63
Mistura 2	7,98	69,34	13,91	8,77
Mistura 2	8,27	69,77	13,37	8,59
Mistura 2	8,24	69,51	13,70	8,55
Mistura 2	8,64	68,70	14,69	7,97
Média	8,23 (\pm 0,45)	69,26 (\pm 0,94)	14,00 (\pm 1,16)	8,51 (\pm 0,66)
Mistura 3	6,80	71,61	11,16	10,43
Mistura 3	8,26	69,81	13,34	8,59
Mistura 3	8,57	68,21	15,31	7,91
Mistura 3	8,23	69,48	13,75	8,54
Mistura 3	8,13	68,69	14,79	8,39
Mistura 3	7,14	71,19	11,69	9,98
Mistura 3	8,32	69,83	13,36	8,49
Média	8,11 (\pm 0,50)	69,54 (\pm 1,04)	13,71 (\pm 1,27)	8,65 (\pm 0,70)

Nota: Base úmida. Média (e desvio padrão).

Fonte: Autor (2021).

ANEXO R – Aumento de massa e altura após 60 minutos de absorção de água e redução de massa após secagem ao ambiente – teste 1.

Número (Tipo)	Aumento de massa (água) (%)	Aumento da altura (%)	Secagem por 48h (%)
1 (140°C/20%RSU)	180,48%	101,38%	17,61%
2 (140°C/10%RSU)	253,17%	146,88%	17,40%
3 (140°C/0%RSU)	360,36%	102,90%	16,84%
4 (100°C/20%RSU)	312,45%	300,95%	12,17%
5 (100°C/10%RSU)	315,81%	247,52%	13,88%
6 (100°C/0%RSU)	352,50%	244,44%	12,25%
7 (60°C/20%RSU)	394,42%	142,00%	12,93%
8 (60°C/10%RSU)	279,39%	100,00%	19,88%
9 (60°C/0%RSU)	305,56%	155,63%	16,16%
10 (26°C/0%RSU)	359,62%	258,16%	16,65%

Fonte: Autor (2021)

ANEXO S – Laudo com resultados da análise do glicerol utilizado nos testes de absorção de água



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **25673/93466**
 Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(na) ensaiado(s) ou calibrado(s).
 Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIOS EM GLICERINA

Cliente:

Item ensaiado: (01) uma amostra entregue à CIENTEC, coletada e identificada pelo Cliente como "Glicerina Bruta".

Data do recebimento do item: 10 de novembro de 2008.

Período da realização dos ensaios: de 12 de novembro a 08 de dezembro de 2008.

Métodos: ASTM: D-5865/2007: poder calorífico superior e cálculo do inferior, por bomba calorimétrica isoperibol; D-5373/2008: carbono, hidrogênio, nitrogênio (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo CHN - 600; D-1552/2007: enxofre total (combustão da amostra com detecção por infravermelho), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo SC - 132.


RESULTADOS:

Amostra	Glicerina
Enxofre total _(b.c.r.) , %	n.d.
Carbono _(b.c.r.) , %	33,27
Hidrogênio _(b.c.r.) , %	8,74
Nitrogênio _(b.c.r.) , %	0,09
Poder calorífico Superior _(b.c.r.) , kcal/kg	3.625
Poder calorífico Inferior _(b.c.r.) , kcal/kg	3.175

Observações:

- 01) Abreviaturas: (b.c.r.) = base como recebida, n.d. = não detectado.
 02) O limite de detecção para o enxofre é de 0,01%.
 03) % = g/100g.

Porto Alegre, 9 de dezembro de 2008.


 Eng.º Quím.º Ernesto Diestel Júnior
 Gerente do Departamento de Química


 Quím.ª Iolanda Dill Fernandes
 Responsável Técnico CRQ 05200044 – 5.ª Região
 Coordenadora do Laboratório de Ensaios em Combustíveis

1/1