



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Eduarda Piaia

**Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de
Combustível Derivado de Resíduos - CDR**

FLORIANÓPOLIS

2021

Eduarda Piaia

**Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de
Combustível Derivado de Resíduos - CDR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^o Armando Borges de Castilhos Júnior, Dr.

Coorientador: Prof^o Willian Cezar Nadaleti, Dr.

Florianópolis

2021

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

Piaia, Eduarda

Uso de rejeitos da coleta seletiva de materiais
recicláveis para produção de combustível derivado de resíduos
- CDR / Eduarda Piaia ; orientador, Armando Borges de
Castilhos Júnior, coorientador, Willian César Nadaleti,
2021.

133 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3.
Associações de Catadores. 4. Combustíveis Derivados de
Resíduos. 5. Cimenteiras. I. Castilhos Júnior, Armando
Borges de . II. Nadaleti, Willian César. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental. IV. Título.

Eduarda Piaia

Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de Combustíveis Derivados de Resíduos - CDR

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

Prof. Mário Augusto Tavares Russo, Dr.
Instituto Politécnico de Viana de Castelo

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcelo Seleme Matias
Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

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

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Armando Borges de Castilhos Júnior, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditam na pesquisa científica como forma de desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias.

AGRADECIMENTOS

O momento de tecer os agradecimentos é a oportunidade de olharmos com carinho para toda a trajetória, sabendo que muito chão foi percorrido para chegar até o final. Pensando em tantas pessoas que eu preciso agradecer pelo auxílio na execução do presente trabalho consigo perceber aquela velha frase: sozinhos vamos mais rápido, mas juntos vamos mais longe. Tenho muito orgulho de ter realizado toda a minha formação acadêmica na Universidade Federal de Santa Catarina, com certeza fazer pesquisa nos dias de hoje tem se tornado cada vez mais difícil, muitos são os percalços, e uma das maiores lições que levo do mestrado é a resiliência, sabendo que dias melhores virão para a pesquisa brasileira.

Primeiramente gostaria de expressar a minha gratidão à Deus, à Deusa, à todas as egrégoras de luz que estiveram iluminando a minha jornada do mestrado.

Gratidão eterna aos meus pais, Cleudete (Grande Sorriso) e Alberto (Éragon), e ao meu irmão, Vítor (Tatanka), por serem meu porto seguro, minha fortaleza, meu local de aconchego e meu ninho para onde sempre posso voltar depois dos meus voos. À eles que vibram a cada conquista minha e me incentivam na busca pelo meu melhor todos os dias, recordando da força que tenho e que sou.

Expressar minha imensa gratidão à minha amiga de longa data Giuliana Valentini, profissional competente e dedicada, química excepcional, que esteve ao meu lado em um dos momentos mais decisivos da minha vida nos últimos tempos. Por me dar a mão quando eu precisei e por gentilmente ceder seu tempo para me auxiliar. Por todas as explicações sobre a parte química que eu não tinha domínio, pelas pizzas e pelas conversas sobre nossas pesquisas.

Um agradecimento mais que especial para a minha amiga Jaqueline Fernandes Soares, por me tirar da toca quando eu dizia que precisava escrever, pelas risadas trocadas, pelos rolês aleatórios, trabalhos de modelo e infinitos cafés com bolo. À minha amiga Mariane Wolff por ser tão apaixonada por resíduos quanto eu e topar um desafio já na fase final do mestrado.

Agradeço ao Engenheiro Sanitarista e Ambiental Bruno Veira Luiz, da COMCAP, pelo envio das informações sobre resíduos recicláveis e rejeitos das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis.

Agradeço ao professor Alexandre Luiz Parize, do Grupo de Estudos em Materiais Poliméricos (POLIMAT) pelo empréstimo do moinho para preparo das amostras de resíduos e à Natália Caon pelo auxílio na operação do equipamento.

Agradeço à professora Tatiane de Andrade Maranhão, do Laboratório de Espectrometria de Massas e Atômica / Laboratório de Análises de Resíduos (LEMA/LERES)

por mediar o contato com os professores responsáveis pelo equipamento de fluorescência atômica e pelo auxílio na definição da metodologia para as análises de mercúrio. Igualmente ao mestrando do LEMA/LERES Matheus Oliveira Muller pela execução dos ensaios para determinação do mercúrio.

Agradeço à professora Débora Machado Fracalossi, do Laboratório de Nutrição de Espécies Aquícolas (LABNUTRI) pelo empréstimo da bomba calorimétrica para desenvolvimento das análises de poder calorífico. À técnica do LABNUTRI Katharine, pelo treinamento para utilização do equipamento e por seu bom humor e confiança quando pensei que não conseguiria executar as análises.

Agradeço à Aline Freitas, técnica do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pela realização das análises de metais, cloretos e no preparo das amostras para a determinação de mercúrio.

Agradeço aos catadores das Associações ACMR, Sul Recicla e Renascer, primeiramente pelo importantíssimo trabalho que desenvolvem e em seguida pela gentileza em permitir que eu coletasse as amostras de resíduos para esta pesquisa.

A todos os membros do LARESO meu agradecimento pelas trocas de conhecimentos e por nos lembrarmos dos outros quando o assunto é resíduos sólidos. Ao Ailton que entrou no mestrado junto comigo e com seu jeito professor sempre explicou maravilhosamente assuntos que eu tinha dúvida, principalmente a estatística. À Keylla que trabalhou comigo antes mesmo de eu ingressar no mestrado e sempre se mostrou muito solícita em todas as demandas.

Agradeço à Natalia Citti e ao Henrique Pereira de Lucas por confiar em mim e desenvolvermos juntos os respectivos Trabalhos de Conclusão de Curso. À bolsista Luisa Camargo, que chegou já no final da jornada para me ajudar a cumprir todos os prazos e executar todas as análises propostas.

Agradeço às meninas da UFPel, Carolina da Silva e Paula Haertel pela parceria na publicação de artigos em eventos científicos. Igualmente ao Vítor, doutorando da USP, pelo auxílio na determinação dos cenários econômicos.

Agradeço ao professor Armando pela orientação, por instigar em mim a curiosidade no tema de pesquisa escolhido e me incentivar a sair da minha zona de conforto, pelas contribuições valorosas para o desenho final do presente trabalho.

Agradeço ao professor Willian pela coorientação, por sempre incentivar a produção científica e por sempre trazer os temas mais atuais e relevantes em termos de pesquisa.

Por fim, agradeço à CAPES pela concessão de bolsa durante este período.

“Quando o sangue das tuas veias regressar ao mar e a rocha dos teus ossos regressar ao solo, talvez então te lembres que esta terra não te pertence, és tu que pertence a esta terra”. Provérbio Nativo Americano.

RESUMO

No Brasil, os resíduos sólidos urbanos, após sua geração, normalmente são encaminhados para aterros sanitários e lixões, representando um desafio frequente para os municípios visto o crescimento da necessidade de áreas para disposição final. Para aproveitar boa parte dos resíduos gerados uma alternativa é o seu envio à coleta seletiva, que contribui para que os materiais retornem ao ciclo produtivo ao mesmo tempo que proporcionam renda para catadores de materiais recicláveis. O processo funcionaria sem falhas se todos os materiais que chegassem até as organizações de catadores fossem, de fato, aproveitados. Entretanto o que se observa é uma grande quantidade de rejeitos que necessitam ser encaminhados para aterros sanitários. Com a edição da Portaria Interministerial nº 274, em 2019, e da norma ABNT 16.849/2020 que disciplina a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, uma alternativa ao aterramento de resíduos está em foco, os chamados Combustíveis Derivados de Resíduos - CDR. Neste contexto, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar a viabilidade da produção de CDR a partir dos rejeitos de Associações de Catadores de Materiais Recicláveis para utilização em fornos de produção de clínquer. Para isso foram obtidas amostras de rejeitos através de amostragem aleatória simples para determinação das suas características físicas e químicas. Além disso, foram estimadas as emissões atmosféricas evitadas ao substituir o combustível convencional de cimenteiras pelo CDR e a determinação dos custos para implantação de uma planta de produção de CDR. Como principais resultados foi possível observar que dos rejeitos das Associações de Catadores do município de Florianópolis 60,27% podem ser utilizados para fins de recuperação energética. Dos materiais elegíveis para a produção de CDR, 75,26% são compostos por embalagens de macarrão e biscoitos, embalagens de bolo e papel. A granulometria dos materiais apresenta-se principalmente entre 150 e 300 mm, indicando a necessidade de etapas de trituração antes da utilização direta dos rejeitos em fornos de cimenteiras. Todos os dados de poder calorífico, teor de cloro e teor de mercúrio puderam ser comparados com a NBR 16.849/2020, gerando CDR classificado como P2 C3 H1, como P1 C3 H3 e P1 C3 H3 nos três locais analisados. Dentre os metais analisados, cromo e cádmio não foram identificados. Para as emissões atmosféricas observou-se que a utilização de CDR proporciona uma diminuição de 4,83%, 14,73% e 13,37% nas emissões de toneladas de CO₂ equivalente nos cenários avaliados. Com relação aos custos estima-se um preço de R\$30,27 por tonelada de CDR, representando uma economia de 35 vezes com relação ao coque de petróleo. Desta forma, conclui-se a viabilidade ambiental e econômica da utilização de CDR proveniente dos rejeitos das Associações de Catadores.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Associações de Catadores. Combustíveis Derivados de Resíduos. Cimenteiras.

ABSTRACT

In Brazil, municipal solid waste, after its generation, is normally sent to sanitary landfills and dumps, representing a frequent challenge for municipalities, given the growing need for areas for final disposal. To take advantage of much of the waste generated, an alternative is to send it to selective collection, which contributes to the materials returning to the production cycle while providing income for waste pickers. The process would work flawlessly if all the materials that reached the waste picker organizations were, in fact, used. However, what is observed is a large amount of rejected fractions that need to be sent to landfills. With the issuance of Interministerial Ordinance No. 274, in 2019, and ABNT 16.849/2020, which governs the energy recovery of municipal solid waste, an alternative to waste landfill is in focus, the so-called Solid Recovered Fuel - SRF. In this context, this research aims to evaluate the feasibility of producing SRF from waste from Associations of Waste Pickers for use in cement kilns. For this purpose, samples were obtained through simple random sampling to determine their physical and chemical characteristics. In addition, the avoided atmospheric emissions by replacing conventional cement fuel with SRF were estimated, as well as the determination of costs for the implementation of a SRF production plant. As main results, it was possible to observe that 60.27% of the waste from Waste Pickers Associations in the city of Florianópolis can be used for energy recovery purposes. Of the materials eligible for the production of SRF, 75.26% are made up of plastic packaging and paper. The particle size of the materials is mainly between 150 and 300 mm, indicating the need for crushing steps before the direct use of SRF in cement kilns. All data on calorific value, chlorine content and mercury content could be compared with NBR 16.849/2020, generating CDR classified as P2 C3 H1, as P1 C3 H3 and P1 C3 H3 in the three analyzed locations. Among the analyzed metals, chromium and cadmium were not identified. For atmospheric emissions it was observed that the use of SRF provides a decrease of 4.83%, 14.73% and 13.37% in the emissions of tons of CO₂ equivalent in the evaluated scenarios. With regard to costs, a price of R\$30.27 per ton of SRF is estimated, representing a savings of 35 times compared to petroleum coke. In this way, the environmental and economic viability of the use of SRF coming from the waste from Collectors Associations is concluded.

Keywords: Municipal Solid Waste. Waste Pickers Associations'. Solid Recovered Fuel. Cement Plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de CDR do tipo <i>Fluff</i>	35
Figura 2 - Etapas do processo produtivo de cimento.	41
Figura 3 - Localização das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis estudadas. ...	48
Figura 4 - Fluxograma metodológico da obtenção das amostras de rejeitos, análises físico-químicas e emissões atmosféricas.	50
Figura 5 – Big bag de rejeitos.....	52
Figura 6 – Rejeitos homogeneizados.....	52
Figura 7 - Frações opostas descartadas.	52
Figura 8 – Rejeitos segregados em 10 categorias.....	52
Figura 9 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria Embalagem Metalizada.	53
Figura 10 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria embalagem de macarrão e afins.	53
Figura 11 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria embalagens de bolo e afins.....	54
Figura 12 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria dois materiais.	55
Figura 13 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria isopor.	56
Figura 14 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria leitoso.....	56
Figura 15 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria papel.....	57
Figura 16 - Fitas de Kapton com amostra de CDR antes de ser inserida na prensa.	60
Figura 17 - Prensa hidráulica utilizada para confecção das pastilhas.....	60
Figura 18 - Modelo de calorímetro utilizado.....	60
Figura 19 - Exemplo de amostra preparada para determinação do teor de cinzas e umidade. .	62
Figura 20 - Moinho MA048 utilizado no preparo das amostras.....	64
Figura 21 - Amostras após processamento no moinho MA048.	64
Figura 22 – Box plot da primeira medida de poder calorífico entre as Associações estudadas.	82
Figura 23 – Box plot da segunda medida de poder calorífico entre as Associações estudadas.	82
Figura 24 – Box plot dos resultados dos teores de cinza nas Associações analisadas.	86
Figura 25 – Box plot dos resultados de umidade identificados nas Associações.....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de Combustíveis Alternativos.	30
Quadro 2 - Normativas brasileiras sobre tratamento térmico de resíduos, coprocessamento para produção de clínquer e emissões de poluentes atmosféricos.....	37
Quadro 3 - Limites para classificação dos RSU com fins energéticos.....	38
Quadro 4 - Normativas estrangeiras sobre Combustíveis Derivados de Resíduos.....	38
Quadro 5 - Principais reações do processo de clínquerização, dividido por faixas de temperatura.....	41
Quadro 6 - Principais parâmetros químicos utilizados para controle de qualidade do clínquer e valores ideais.....	42
Quadro 7 - Composição das amostras para determinação de mercúrio.....	65
Quadro 8 - Variáveis químicas analisadas, métodos e equipamentos.....	65
Quadro 9 - Fatores de emissão utilizado para o cálculo das emissões atmosféricas.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos da coleta seletiva das Associações participantes do estudo.	70
Tabela 2 - Evolução dos quantitativos de resíduos recicláveis e rejeitos em Florianópolis entre 2017 e 2020.	76
Tabela 3 - Resultados do teste de homogeneidade das variâncias para cada categoria.....	77
Tabela 4 - P valor da ANOVA de uma via.	77
Tabela 5 - P valor dos testes de Shapiro Wilk aplicados para cada categoria e cada Associação.	80
Tabela 6 – Poder calorífico identificado nas amostras.	81
Tabela 7 – Correlações não-paramétricas de Spearman PCI x categorias.	83
Tabela 8 – Teores de cinzas identificados nas amostras.	85
Tabela 9 – Teor de umidade identificado nas amostras.....	87
Tabela 10 – Teores de cloro identificados nas amostras.	90
Tabela 11 – Correlação não paramétrica cloro x categorias.....	92
Tabela 12 - Teor de zinco identificado nas amostras.	93
Tabela 13 - Correlação categorias x zinco.....	94
Tabela 14 - Teor de cobre identificado nas amostras.	96
Tabela 15 - Correlação cobre x categorias.	97
Tabela 16 - Teor de mercúrio nas amostras analisadas.	99
Tabela 17 - Emissões atmosféricas resíduos x coque de petróleo.	101
Tabela 18 - Emissões atmosféricas evitadas pela substituição de coque de petróleo por resíduos.	101
Tabela 19 - Composição de custos de instalação cenário 1.....	103
Tabela 20 - Classificação das amostras analisadas de acordo com a NBR 16.849/2020.	107
Tabela 21 - Composição gravimétrica dos rejeitos ACMR.....	122
Tabela 22 - Composição gravimétrica dos rejeitos Sul Recicla.	123
Tabela 23 - Composição gravimétrica dos rejeitos Renascer.....	124
Tabela 24 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação Sul Recicla.	125
Tabela 25 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação ACMR.....	126
Tabela 26 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação Renascer.....	127
Tabela 27 - Composição das amostras coletadas na ACMR.	128
Tabela 28 – Composição das amostras coletadas na Associação Renascer.	129

Tabela 29 - Composição das amostras coletadas na Associação Sul Recicla.	130
Tabela 30 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na ACMR.	131
Tabela 31 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na Sul Recicla.	132
Tabela 32 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na Renascer.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública;

ACMR – Associação de Coletores de Materiais Recicláveis;

BOPP - Polipropileno biorientado;

CBO – Classificação Brasileira de Ocupações;

CDR – Combustível Derivado de Resíduo;

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem;

CH₄ – Metano;

Cl – Cloro;

CO₂ – Dióxido de Carbono;

COMCAP – Autarquia de Melhoramentos da Capital;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

DVCOS – Divisão de Coleta Seletiva;

EPE – Empresa Brasileira de Pesquisa Energética;

Fluff – CDR na forma de materiais soltos, com granulometria específica;

Hg – Mercúrio;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

MNCR – Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis;

N₂O - Óxido Nitroso;

NBR – Norma Brasileira;

NO_x - Óxidos de Nitrogênio;

PCI – Poder Calorífico Inferior;

PEV – Ponto de Entrega Voluntária;

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos;

PVDC - Cloreto de Polivinilideno

Renascer - Cooperativa de Trabalho Beneficente de Coletores de Materiais Recicláveis

Renascer 4R;

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos;

SIMA - Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo;

SNIS – Sistema de Informações Sobre Saneamento;

SO₂ - Dióxido de Enxofre

Sul Recicla - Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Materiais Recicláveis Sul Recicla.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	18
2. Objetivos.....	21
2.1 Objetivo Geral.....	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. Revisão Bibliográfica	22
3.1 Resíduos Sólidos.....	22
3.2 Coleta Seletiva e Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis.....	24
3.2.1 Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis	24
3.2.2 Coleta Seletiva e Geração de Rejeitos.....	26
3.3 Combustíveis Alternativos.....	30
3.4 Combustíveis Derivados de Resíduos.....	31
3.4.1 Tipos e Classes de CDR	34
3.4.2 Contexto Legal para a Utilização de CDR	36
3.5 Indústria de Cimento e Coprocessamento.....	39
3.5.1 Processo Produtivo	39
3.5.2 Indústria do Cimento e Emissões de Poluentes.....	42
3.5.3 Utilização do CDR em Fornos de Cimenteiras	44
4. Materiais e Métodos	47
4.1 Caracterização da área de estudo	47
4.1.1 Roteiros da Coleta Seletiva.....	49
4.2 Procedimentos para a coleta dos dados.....	49
4.2.1 Quantificação dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva	50
4.2.2 Caracterização Gravimétrica e Granulométrica dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva	51
4.2.3 Caracterização química dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva	59

4.2.4	Comparação das emissões atmosféricas geradas pelo rejeito e pelo coque de petróleo, considerando cada um como combustível de alto forno de cimento.....	66
4.3	Determinação dos custos de implantação	66
4.4	Tratamento estatístico das amostras.....	67
5.	Resultados.....	69
5.1	Roteiros de coleta X Associações	69
5.2	Granulometria dos Rejeitos	70
5.3	Quantificação e composição gravimétrica dos rejeitos das associações.....	73
5.4	Composição gravimétrica dos rejeitos utilizados para a produção de CDR.....	76
5.5	Potencial energético dos rejeitos como CDR	80
5.6	Caracterização Química do CDR Proposto.....	84
5.6.1	Teor de Cinzas	85
5.6.2	Teor de Umidade	87
5.6.3	Cloro	90
5.6.4	Zinco.....	93
5.6.5	Cobre	95
5.6.6	Cromo	98
5.6.7	Cádmio	98
5.6.8	Mercúrio	99
5.7	Emissões Atmosféricas Evitadas	100
5.8	Cenários Econômicos para utilização de CDR.....	102
6.	Discussão	104
7.	Conclusões e Recomendações	108
7.1	Conclusões	108
7.2	Recomendações	111

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos tornou-se uma questão de crescente preocupação global, ao passo que as populações urbanas continuam a crescer e os padrões de consumo se alteram (MARSHALL; FARAHBAKHS, 2013). O crescimento populacional, econômico e os avanços tecnológicos constituem um grande desafio da atualidade para as estratégias de redução, valorização/recuperação, tratamento e a disposição final, as quais necessitam ser corretamente abordadas pelos gestores destes materiais residuais, pois apresentam influência direta na disponibilidade dos recursos naturais (ZHAO et al., 2016).

Embora o aterro sanitário seja considerado uma das mais eficientes e seguras técnicas de disposição de resíduos sólidos, o aterramento dos resíduos gera um significativo aumento da emissão de poluentes, como o chorume e o metano, as consequências permanecem por um longo período, mesmo após a sua desativação, e requer métodos sofisticados de controle e tratamento (FRICKE; PEREIRA, LEITE, BAGNATI, 2015). Além disso, a instalação de um aterro sanitário demanda grandes áreas de terras, que podem interferir na disponibilidade destas, de acordo com os critérios estabelecidos pela Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 8.419/1992. Segundo dados do SNIS, referente ao ano base 2019, foram destinados aos aterros sanitários 43.167.237,60 toneladas de resíduos, enquanto para Unidades de Triagem de resíduos recicláveis foram destinados apenas 4.519.162,20 toneladas de resíduos (BRASIL, 2020).

Uma das justificativas para diminuir a quantidade de materiais dispostos em aterros sanitários está no poder calorífico destes, que pode ser aproveitado como recurso energético, além dos problemas causados pela presença de materiais biodegradáveis (RADA; RAGAZZI, 2014). Confirma-se que a solução para a questão dos resíduos não pode ser a simples coleta, mas deve ser um conjunto de ações, incluindo um papel decisivo na recuperação de energia (PAOLO; PAOLA, 2015).

Uma alternativa para a redução do montante de resíduos encaminhados à destinação final é a coleta seletiva, a qual recolhe materiais recicláveis e os encaminha, via de regra, para Associações e Cooperativas de Catadores. O processo realizado nas organizações de Catadores seria perfeito e conseguiria fechar o ciclo, entretanto existem fatores que o atrapalham, como o tipo de material que dá origem às embalagens, por exemplo, o que acarreta em falta de compradores e, conseqüentemente, a inutilização de determinados tipos de resíduos para a reciclagem. Além disso, determinados tipos de materiais não possuem tecnologia para a reciclagem no país e acabam tornando-se rejeito dentro das Associações e Cooperativas de

Catadores. Ou seja, resíduos que deveriam ser reciclados são encaminhados para os aterros sanitários, contribuindo para o esgotamento das áreas de aterro e ‘enterrando’ materiais que possuem potencial de aproveitamento. Uma das melhores alternativas para fechar o ciclo na economia circular é a utilização dos rejeitos com alto poder calorífico como combustível (SHUMAL et al, 2020). A recuperação de energia é uma maneira igualmente sustentável de explorar os recursos energéticos contidos nos resíduos que, de outra forma, são depositados em aterros sanitários, levando à poluição de longo prazo (USÓN et al., 2011).

Considerando a implementação de um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos, que atenda princípios de eficiência e sustentabilidade, a utilização de resíduos sólidos urbanos para a recuperação de energia parece indispensável (PAOLO; PAOLA, 2015). Ainda, no atual contexto da gestão de resíduos no Brasil, onde atores como os catadores de materiais recicláveis reivindicam um papel preponderante no sistema de gestão de RSU, a recuperação energética dos rejeitos da coleta seletiva nas cidades constitui estratégia suplementar de produtividade e renda no trabalho da catação dos materiais recicláveis, na perspectiva de melhoria dos indicadores sociais deste setor de trabalhadores da área de RSU.

Dentre as diversas tecnologias que podem ser empregadas para o pleno aproveitamento dos rejeitos da coleta seletiva pode-se citar a utilização destes como Combustível Derivado de Resíduo – CDR. A razão para utilização como CDR reside no alto poder calorífico, uniformidade física e química dos componentes, além da diminuição da poluição (SHUMAL et al, 2020). Este CDR pode ser enviado para fornos de produção de clínquer, o qual alia o aproveitamento energético de produtos que seriam enviados ao aterro com um processo produtivo que requer altas temperaturas para ocorrer e oferece garantia de destruição térmica dos resíduos (GENON; BRIZIO, 2008). Desta forma, visto a variabilidade das características dos RSU entre os países, cabe a necessidade de verificar a potencialidade dos resíduos gerados no Brasil para a produção de CDR.

A indústria cimenteira é caracterizada pela geração de intensos impactos ambientais tendo em vista a utilização do coque de petróleo, um material fóssil, como principal combustível nos altos fornos para a produção de clínquer (REZA et al., 2013). A substituição de combustíveis convencionais por CDR pode ser considerada como uma opção para reduzir a poluição ambiental associada à produção de cimento (MADLOOL et al., 2011). Diante disto, a integração entre o mercado do cimento e o mercado dos resíduos traduz-se em uma parceria positiva, tendo em vista que a indústria cimenteira possui compromissos para a redução das emissões de gases do efeito estufa e o mercado de resíduos pode proporcionar a matéria prima para a redução dos impactos ambientais. Para reduzir os custos ambientais e de energia, os

produtores de cimento estão utilizando atualmente uma mistura de combustíveis alternativos com combustíveis fósseis tradicionais (RAHMAN, 2013).

Isto posto, justifica-se o presente trabalho visto a necessidade de pesquisar acerca da recuperação energética de resíduos, alternativa em franca expansão em diversos países como Dinamarca, Suécia, Holanda e Alemanha, entre outros, e que pode auxiliar o Brasil na questão da disponibilidade de áreas para aterros sanitários ao mesmo tempo em que proporciona uma nova fonte de renda aos catadores de materiais recicláveis, que poderão vender os rejeitos como matéria-prima para a indústria de cimento. Além disso, a presente pesquisa torna-se determinante para compreender a possibilidade de utilização dos rejeitos de coleta seletiva como CDR em fornos de produção de clínquer, visto a edição da Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019, que propõe a modificação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e a inclusão dos CDRs como alternativa para o tratamento dos resíduos sólidos, nos termos do artigo 9º, parágrafo 1º.

Sendo assim, a temática da presente pesquisa aborda a produção de Combustíveis Derivados de Resíduos, tendo como problema e pergunta de pesquisa, o seguinte questionamento: A recuperação dos rejeitos da coleta seletiva em CDR para utilização no processo produtivo do cimento pode ser uma alternativa tecnicamente viável ao aterramento destes materiais e estratégia de gestão destes rejeitos considerada ambientalmente e economicamente viável?

Hipotetiza-se que a produção de CDR a partir dos rejeitos de materiais recicláveis pode ser uma alternativa técnica tendo em vista suas características físicas (composição e tamanho de partícula ideal para queima) e químicas (poder calorífico inferior, teor cinzas, teor de cloro, teor mercúrio, cádmio, cobre, cromo e zinco). Além disso, acredita-se que o impacto ambiental associado às emissões atmosféricas ocasionadas pelo CDR de rejeito seja menor que o impacto ambiental do coque de petróleo, combustível convencional amplamente empregado em cimenteiras do Brasil.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar energeticamente e economicamente a viabilidade da produção de Combustíveis Derivados de Resíduos a partir dos rejeitos das Associações de Catadores de material reciclável do município de Florianópolis-SC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar a variabilidade da composição gravimétrica dos rejeitos da coleta seletiva das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis;
2. Verificar o Poder Calorífico do *blend* de rejeito da coleta seletiva para uso como combustível em fornos de cimento;
3. Analisar as características químicas do *blend* de rejeito e o potencial poluente dos mesmos em termos de uso como material combustível em fornos de cimento;
4. Comparar as emissões atmosféricas geradas pelo *blend* de rejeito e pelo coque de petróleo, considerando cada um como combustível de alto forno de cimento;
5. Comparar os resultados obtidos com a legislação brasileira sobre resíduos sólidos urbanos com fins energéticos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 10.004/2004 os resíduos sólidos podem ser definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004).

Com a edição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010, tem-se uma definição mais atualizada do conceito de resíduo sólido no Brasil, que pode ser entendido como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Segundo Pinz (2012) os resíduos são decorrentes da forma industrial de produção de bens e do modo de vida, caracterizado principalmente pelos hábitos consumistas da sociedade moderna como condição de garantir o funcionamento desta e da grande proporção assumida pelo descarte de materiais, em que comprar um novo produto é mais simples do que consertar ou reutilizar um antigo.

A palavra resíduo sólido traz consigo o significado de que o material, anteriormente objeto de descarte, ainda possui utilidade em outra cadeia produtiva. Neste ponto pode-se observar o que dispõe a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual cita em diversos momentos a reutilização e a reciclagem, ou seja, a utilização de resíduos sólidos para a fabricação de outros produtos.

Para que a correta técnica de reutilização e reciclagem seja empregada, cabe a necessidade de conhecer as diferentes classificações resultantes do universo que é a temática dos resíduos sólidos. “A classificação dos resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes

constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido” (ABNT, 2004). Pode ser feita de acordo com dois fatores: a origem dos resíduos sólidos e a sua periculosidade.

A NBR 10.004/2004 é a principal norma de classificação utilizada no Brasil e divide os resíduos em classes, as quais são elencadas de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Para a determinação da classe a qual o resíduo pertence são realizados os ensaios constantes nas Normas Brasileiras 10.005 a 10.007/2004, após os quais permitem classificar os resíduos da seguinte maneira:

- Resíduos classe I – Perigosos: Aqueles que apresentam periculosidade (característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar risco à saúde pública ou risco ao meio ambiente) ou características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos classe II – Não Perigosos: Divididos em outras duas classificações:
 - Classe II A – Não Inertes: Aqueles que não são enquadrados como classe I – Perigosos ou de classe IIB – Inertes, de acordo com o disposto na NBR 10.004/2004. Os resíduos classe IIA podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

Dentre as origens dos resíduos sólidos a porcentagem mais significativa diz respeito aos resíduos sólidos urbanos – RSU. Os RSU são compostos pelos resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana, conforme expõe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Presente em todas as cidades e resultado das atividades humanas os RSU podem ser vistos como um grande problema do ponto de vista ambiental. Devido ao consumo de bens e produtos que ocorre diariamente a geração de resíduos nunca para, fato que exige uma gestão consciente para manejo e destinação final ambientalmente adequada (PASCHOALIN FILHO et al., 2014).

Para Farias e Verdum (2016)

Em meio à crise que paira sobre a atual relação sociedade-natureza, os resíduos sólidos urbanos consistem em um dos maiores problemas ambientais e de saúde pública enfrentados pela humanidade, pois apresentam-se como um verdadeiro dilema da modernidade. Sendo constante e significativa a produção diária de resíduos sólidos nos espaços urbanos, o destino final ambientalmente adequado representa um desafio

de difícil resolução para as administrações públicas nos mais diversos lugares do mundo.

No Brasil, a massa coletada per capita de resíduos sólidos é de 0,99 kg/hab/dia, sendo que no estado de Santa Catarina este montante é de 0,85 kg/hab/dia, o que significa um total de 178,40 mil toneladas de RSU por dia necessitando de gerenciamento adequado (BRASIL, 2020). Entre os anos de 2018 e 2019 registrou-se um aumento de 3,70% na estimativa da quantidade de RSU coletados, passando de 62,78 milhões de toneladas em 2018 para 65,11 milhões de toneladas em 2019 (BRASIL, 2020). Na comparação entre os anos de 2018 e 2019 houve um crescimento populacional de 0,83% e 1,05% na massa de RSU coletada per capita, ou seja, a geração per capita diária de RSU mantém-se acima do crescimento populacional (BRASIL, 2020).

A taxa de cobertura de coleta de resíduos domésticos em relação à população urbana no ano de 2019 foi de 98,80% (BRASIL, 2020). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no documento intitulado Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (BRASIL, 2020), 56,94% dos resíduos são encaminhados para aterros sanitários, 8,7% para aterros controlados e 9,55% para lixões, o que demonstra que muito ainda precisa ser feito com relação à destinação final ambientalmente adequada, incluindo ações como redução do volume de resíduos recicláveis, aumento de iniciativas de compostagem e reciclagem e a adoção de novas técnicas, como é o caso dos combustíveis derivados de resíduos.

3.2 COLETA SELETIVA E ORGANIZAÇÕES DE CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS

3.2.1 Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis

A profissão de catador de material reciclável é reconhecida, desde o ano 2002, pela Classificação Brasileira de Ocupações (CBO), por meio da portaria nº 397 de 09/10/02 do Ministério do Trabalho e Emprego sob o código nº 5.192-05. Catadores de Materiais Recicláveis são aqueles que recolhem, selecionam e vendem materiais recicláveis e se organizam de forma autônoma ou em cooperativas/associações, com diretoria e gestão próprias.

A motivação dos catadores de materiais recicláveis teve significativos avanços nos últimos anos, principalmente após começarem a se organizar em cooperativas ou associações.

Esta organização fomentou o fortalecimento destes trabalhadores, principalmente no que tange à sua identidade perante a sociedade e o governo (SOUZA; SILVA; BARBOSA, 2014).

As organizações de catadores de materiais recicláveis representam uma forma de empreendimento social, na qual a produção de mercadorias e serviços ocorre em um ambiente de respeito pela eficiência técnica e econômica, e solidariedade entre os trabalhadores (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015). O papel destas organizações na cadeia da reciclagem é o de recuperar materiais pós-consumo e atuar como abastecedor de matérias-primas da indústria da reciclagem. Complementarmente, desempenham papel social, por possibilitarem alternativas de emprego e renda, e papel ambiental, por desviarem parte dos resíduos sólidos dos aterros sanitários e das alternativas de incineração (ALMEIDA et al., 2014).

Como as organizações de catadores podem ser na forma de cooperativas ou associações faz-se necessário compreender as diferenças entre ambas:

- **Associações:** Forma de organização mais simples e com menores custos para implantação, são indicadas para atividades sociais, como, por exemplo, assistência social, educacional, cultural, entre outros. Os associados não são propriamente os donos do negócio (SEBRAE, 2019);
- **Cooperativas:** Têm um objetivo essencialmente econômico e é o meio mais adequado para desenvolver uma atividade comercial em média ou grande escala de forma coletiva. Os cooperados são os donos do patrimônio e os beneficiários dos ganhos (SEBRAE, 2019).

Principalmente após a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), no ano de 2010, as associações e cooperativas tornaram-se protagonistas na realização da coleta seletiva, uma vez que um dos objetivos da PNRS é a “integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos” (BRASIL, 2010).

No decorrer dos anos, os catadores e associações/cooperativas de catadores desenvolveram uma tecnologia social chamada de coleta seletiva solidária, que também pode ser denominada de coleta seletiva com inclusão social ou coleta seletiva com inclusão socioprodutiva de catadores (BESEN et al., 2016). Na coleta seletiva solidária as organizações de catadores são contratadas pelos municípios, como um participante formal do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, funcionando como um prestador de serviços e sendo reconhecido pelo serviço ambiental que desenvolve (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015).

O trabalho desenvolvido pelas organizações de catadores de materiais recicláveis é de suma importância para a reintrodução dos resíduos recicláveis no ciclo produtivo, entretanto

devido à fatores como a má separação por parte da população e a ausência de tecnologias economicamente viáveis muitos resíduos que chegam nas associações tornam-se rejeitos e necessitam de destinação final ambientalmente adequada (PIAIA, 2017).

3.2.2 Coleta Seletiva e Geração de Rejeitos

Coleta seletiva é a coleta dos materiais recicláveis presentes nos RSU, segregados na fonte após a sua geração, seguido do seu acondicionamento e disposição para coleta em dias e horários pré-estabelecidos (BRINGHENTI, 2004). Os materiais coletados seletivamente são destinados à locais de triagem, nos quais será efetuada a classificação adequada e a destinação destes para empresas que farão a reciclagem e a reintrodução destes materiais no ciclo produtivo (AMARAL et al., 2018).

Para Jardim, Yoshida e Machado Filho (2012) a coleta seletiva pode ser definida como a coleta dos resíduos sólidos que foram segregados em sua origem e no momento da geração de acordo com a constituição ou composição dos materiais e que abrange a coleta de materiais recicláveis como papéis, plásticos, vidros, metais, entre outros e também os resíduos orgânicos passíveis de compostagem. A coleta seletiva é uma das etapas de um amplo sistema de gestão integrada de resíduos sólidos, que contribui para minimizar o impacto ambiental associado e para a destinação correta de materiais que possuem potencial de aproveitamento (BARROS et al., 2013)

A coleta seletiva no Brasil tem sido desenvolvida por autoridades municipais, por associações e cooperativas de catadores de materiais recicláveis e por sucateiros, baseada evidentemente na força de trabalho dos catadores, sendo que os materiais regularmente coletados são papel, papelão, plástico, vidro e metal (CAMPOS, 2014). Configura-se em um importante instrumento para a implementação de ações efetivas de reciclagem, proporcionando ganhos econômicos, ambientais e sociais (PASCHOALIN FILHO et al., 2014). Sendo um instrumento de gestão, precisa ser adotada enquanto um mecanismo primordial e indispensável para a ocorrência da reciclagem, tendo em vista a responsabilidade de cada cidadão pelos seus próprios resíduos (FARIAS, VERDUM, 2016).

Dentre os modelos formais de coleta seletiva empregadas no Brasil pode-se citar: porta a porta, Pontos de Entrega Voluntários (PEVs), ponto a ponto (bandeiras) e sistema de trocas. Além destes, a coleta realizada por meio de catadores de rua também pode ser considerada.

No modelo porta a porta o material reciclável seco, previamente segregado, acondicionado e disposto para coleta pelo gerador, é coletado por veículos destinados

exclusivamente para este fim, na porta de cada contribuinte, trazendo mais comodidade aos que usufruem do serviço (BRINGHENTI, 2004).

Os PEVs podem ser constituídos de caçambas, contêineres ou lixeiras de fácil acesso, nas quais a população entrega seus materiais recicláveis, sendo que em alguns locais os resíduos podem ser trocados por alimentos, material de construção, material escolar, entre outros benefícios (CONKE; NASCIMENTO, 2018). “Essa modalidade está baseada na descentralização, pois os equipamentos são distribuídos em diferentes locais públicos da cidade e exige que a população se desloque e descarte o material previamente triado em sua residência” (LIMA, 2006).

A coleta seletiva de ponto a ponto é aquela em que os resíduos são recolhidos nos locais de geração e agrupados em pontos estratégicos, chamados de “bandeiras”, para a posterior coleta pelo caminhão. A coleta seletiva por meio do sistema de trocas é aquela em que os moradores levam seus resíduos até pontos específicos, onde os mesmos são trocados por alimentos, cupons de descontos, entre outros (LIMA, 2013).

Para Besen et al. (2016) “cada uma dessas modalidades tem suas vantagens e desvantagens na perspectiva da sustentabilidade, porém, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o modelo de coleta seletiva sustentável é aquele que integra os catadores de materiais recicláveis”. A avaliação de desempenho da coleta seletiva deve ser realizada levando-se em consideração dois cenários: os sistemas formais que operam com apoio do poder público e os catadores informais, que não são incluídos nas estatísticas oficiais, mas que contribuem significativamente para a coleta seletiva no país (CAMPOS, 2014).

Tendo em vista a necessidade de um intenso trabalho de gestão e educação ambiental para que a coleta seletiva ocorra satisfatoriamente, algumas medidas preparatórias são necessárias para aumentar o quantitativo de resíduos coletados. De acordo com o exposto por Fricke e Pereira (2015) as medidas preparatórias a serem tomadas são, entre outras:

- Ações de capacitação;
- Disponibilização dos dados significativos para o planejamento dos sistemas de coleta, dentre os quais pode-se citar a quantidade e qualidade dos resíduos;
- Os sistemas de coleta já existentes e os que são exigidos;
- Avaliação dos tipos e locais de entrega voluntária existentes e a publicidade requerida;
- Estudos econômicos com foco no rendimento da reciclagem de materiais específicos e a comparação entre os diferentes modelos empregados;

A implantação de sistemas de coleta seletiva está diretamente relacionada ao trabalho desenvolvido pelas organizações de catadores de materiais recicláveis, cerca de 55% do material coletado pelo sistema porta a porta é encaminhado para estes estabelecimentos (CONKE; NASCIMENTO, 2018).

Tendo em vista a qualidade dos materiais recicláveis que chegam até as organizações de catadores de materiais recicláveis, cabe a necessidade de analisar a quantidade de rejeitos presentes nos resíduos da coleta seletiva. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010:

Rejeito são os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Acrescenta-se a este conceito os materiais provenientes do baixo valor de mercado na cadeia de reciclagem, o que inviabilizaria o transporte e a triagem, além do grau de contaminação apresentado em determinados materiais, o que inviabiliza seu aproveitamento (LOPES, 2006).

Sendo assim, rejeitos podem ser definidos como os materiais que não possuem outra utilidade que não a disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários ou encaminhamento para a geração de energia (BESEN et al., 2016) seja por sua composição, baixo valor para venda ou contaminação por determinadas substâncias. A fração de rejeitos é formada por todos os resíduos presentes nos RSU que não foram separadas nas etapas anteriores do processo produtivo e que não atendem os requisitos para serem recuperados, reutilizados ou reciclados (GALLARDO et al., 2014).

É importante salientar que dependendo da região do Brasil, os materiais considerados rejeitos podem variar, principalmente em função de alternativas tecnológicas disponíveis e do valor comercial atribuído a cada material. Cada cidade, em suas campanhas sobre resíduos sólidos, deve mencionar que o que hoje é considerado rejeito poderá, muito brevemente, ser considerado resíduo, tendo em vista a frequente evolução do mercado (BESEN et al., 2016).

Em estudo desenvolvido por Piaia (2017) verificou-se que entre os anos de 2014 e 2016 as três maiores Associações de Catadores do município de Florianópolis apresentaram, em média, 19% de rejeitos. Os rejeitos foram classificados em duas categorias: população, a qual engloba os rejeitos gerados em virtude da má separação por parte da população, incluindo materiais como roupas, papel higiênico, resíduos eletroeletrônicos, calçados e eletrodomésticos, e indústria, a qual engloba os materiais que não possuem tecnologia para a reciclagem na região

da grande Florianópolis ou não são economicamente viáveis para a venda, tais como embalagens de polipropileno biorientado (BOPP), embalagens compostas por dois ou mais materiais, embalagens de isopor com restos de comida, entre outros (PIAIA, 2017). Para as duas categorias consideradas no estudo referente aos rejeitos da coleta seletiva de Florianópolis, em média, 87% dos materiais foram enquadrados na categoria indústria, ou seja, foram classificados como rejeitos pelos triadores em virtude de lacunas no sistema de reciclagem (PIAIA, 2017).

Também no estado de Santa Catarina, Moura, Pinheiro e Carmo (2018) desenvolveram estudo referente à composição gravimétrica dos rejeitos provenientes do processo de segregação dos resíduos sólidos urbanos recicláveis no município de Blumenau. Foi constatada a geração de 30,5%, em média, de rejeitos, compostos por 21,9% de polímeros 3 (plásticos contaminados, marmitas de EPS, plásticos multicamadas), 8,9% de polímeros 2 (BOPP, PET acrílico, poliestireno), 5% de polímeros 1 (embalagens plásticas, plástico filme, PET, polipropileno, isopor, PVC), e 17,3% de orgânicos (MOURA; PINHEIRO; CARMO, 2018).

Em estudo semelhante conduzido por Cembranel et al. (2021) no município de Francisco Beltrão, estado do Paraná, foi possível constatar que a geração de rejeitos provenientes da coleta seletiva do município corresponde a 28% do total de resíduos recicláveis enviados para Associações de Catadores, dos quais 44% correspondem a resíduos orgânicos e 23% correspondem a plásticos. 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).

Enquanto isso, Homse (2017) desenvolveu estudo similar no município de Londrina, estado do Paraná, cuja porcentagem de rejeitos encaminhadas para Associações de Catadores foi de 13%, identificados durante um mês de análises de campo. A composição gravimétrica dos rejeitos apresentou 32% correspondente à tecidos e 28% correspondente à plásticos, com porcentagens menores de papel (8%), madeira (7%), orgânicos (7%), mangueiras (6%), isopor (3%), vidros (2%), eletrônicos (2%), material de limpeza (2%), perigosos (1%), metal (1%) e fraldas (1%) (HOMSE, 2017).

Contrapondo os estudos desenvolvidos por Piaia (2017), Moura, Pinheiro e Carmo (2018), Cembranel et al. (2021) e Homse (2017), o estudo desenvolvido por Melo et al. (2019) em Goiânia identificou uma porcentagem de rejeitos equivalente a 54,6%, em média, sendo compostos majoritariamente por plásticos termoplásticos, com 38%, resíduos orgânicos com 15% e outros, com 16%, entre os quais pode-se citar papéis toalha e higiênico, absorventes, fraldas, preservativos, seringas, entre outros.

Diante do exposto observa-se que grande quantidade dos materiais considerados rejeitos em Associações de Catadores são plásticos, os quais poderiam ser aproveitados para recuperação energética dos materiais, tendo em vista seu alto poder calorífico, contribuindo para o desvio de materiais que seriam encaminhados para aterros sanitários.

3.3 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

A crescente demanda mundial por combustíveis, sejam eles líquidos ou gasosos, além de provocar preocupações no que diz respeito às emissões de gases do efeito estufa, também levou os cientistas a considerarem diferentes fontes alternativas de energia (DUTTA; DAVEREY; LIN, 2014). Combustíveis alternativos são constituídos por misturas de diferentes resíduos, como resíduos industriais, municipais e perigosos, com um conteúdo de energia química apropriado para sua viabilidade de utilização (MOKRZYCKI; ULIASZ-BOCHEŃCZYK; SARNA, 2003).

O processo de aplicação consiste em substituir uma fração do combustível tradicional por recursos alternativos. A introdução de combustíveis alternativos depende do tipo e da composição destes materiais, além da mistura final com os combustíveis tradicionais, o que requer, em alguns casos, modificações nos processos de fabricação se houver uma grande porcentagem de substituição (USÓN et al., 2013). Combustíveis alternativos são geralmente mais baratos do que os combustíveis convencionais, pois a maioria são provenientes de resíduos que requerem apenas custos de processamento (RAHMAN, 2013).

Uma grande variedade de combustíveis pode ser utilizada, sendo classificados em sólidos, líquidos ou gasosos (MOKRZYCKI; BOCHEŃCZYK, 2003). O Quadro 1 expõe alguns exemplos de materiais que podem ser utilizados como combustíveis alternativos, divididos de acordo com o estado físico em que se apresentam.

Quadro 1 - Exemplos de Combustíveis Alternativos.

Estado Físico	Materiais
Líquido	Resíduos químicos industriais, solventes usados, óleos usados, resíduos de tintas, lodo de óleo, resíduos de destilação, suspensões de cera, alcatrão, resíduos petroquímicos;
Sólido	Pneus usados, resíduos de papel, resíduos de plástico, revestimento de células gastas, farinhas de carne e ossos, lodo de esgoto, resíduos sólidos urbanos, biomassa agrícola (resíduos verdes, resíduos de madeira, cascas de nozes, casca de arroz, etc.), combustível derivado de resíduos (CDR), resíduos de borracha, lodo de celulose, estojos de bateria, solos com óleo;
Gasoso	Gás de aterro, gás de pirólise

Fonte: Adaptado de Rahman et al. (2015).

A vantagem significativa da substituição dos combustíveis convencionais por combustíveis alternativos é a preservação de fontes de energia não renováveis, conservação do meio ambiente e redução das áreas destinadas para descarte de resíduos (RAHMAN et al., 2015). Além disso, pode-se citar a diminuição das emissões líquidas de Gases do Efeito Estufa proporcionada pela substituição dos combustíveis fósseis e a redução do uso de materiais naturais (USÓN et al., 2013).

Para garantir a proteção ambiental, alguns requisitos de ordem técnica e normativa precisam ser atendidos, como por exemplo teor de cloro, enxofre, bifenilas policloradas (PCB) e metais pesados (MADLOOL et al. 2011). Adicionalmente, de acordo com Madlool et al. (2011) as seguintes propriedades precisam ser consideradas:

- Estado físico do combustível;
- Composição e teor de cinzas;
- Poder calorífico acima de 3.343,84 kcal/kg;
- Propriedades de moagem;
- Teor de umidade;
- Emissões atmosféricas liberadas;
- Viabilidade econômica da sua utilização.

Na maioria dos casos, combustíveis alternativos são compostos pela mistura de diferentes materiais, tornando-se difícil a determinação do seu valor energético ou constituição (USÓN et al., 2013). Para indústria cimenteira, especificamente, materiais como RSU, óleos, plásticos, madeira, pneus ou lodo são frequentemente utilizados devido ao seu preço e disponibilidade (USÓN et al., 2013).

O uso de combustíveis alternativos tornou-se mais popular entre os fabricantes de cimento devido ao aumento do preço dos combustíveis fósseis, como carvão e coque de petróleo, pelos combustíveis fósseis serem recursos limitados e pelas preocupações ambientais do setor (RAHMAN, 2013). O uso deste tipo de combustível aumenta a cada dia, principalmente para atender os objetivos do desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo que não traz efeitos adversos na qualidade do produto final (RAHMAN, 2013).

3.4 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS

De acordo com a normativa europeia EN 15359:2011 – *Solid recovered fuels – Specifications and classes* o Combustível Derivado de Resíduo – CDR é definido como o

combustível sólido produzido a partir de resíduos não perigosos usados para recuperação de energia em instalações de incineração e co-incineração, respondendo à classificação dada pela normativa citada anteriormente. O CDR é classificado e definido por diversas normas técnicas que visam facilitar a comercialização destes combustíveis para a produção de energia elétrica e para a fabricação de cimento, em substituição aos combustíveis fósseis tradicionais (PAOLO; PAOLA, 2015). Pode-se observar que na maioria dos países desenvolvidos, como Dinamarca, Suécia, Holanda e Alemanha, onde a aplicação da gestão integrada de resíduos ocorre, a recuperação energética de materiais é preferida ao invés da disposição final em aterros sanitários (PAOLO; PAOLA, 2015). O CDR proporciona economia, redução de dióxido de carbono e outras emissões de gases do efeito estufa e pode ser utilizado como um substituto para os combustíveis fósseis convencionais (BRÁS et al., 2017; REZA et al., 2013).

Torna-se atrativo devido à dois principais fatores: produz combustíveis relativamente baratos e prontamente disponíveis e permite a utilização de grandes quantidades de resíduos já acumulados, tendo como objetivo a eliminação dos resíduos em troca de um combustível limpo (KARA, 2012; VALIULLIN; EGOROV; STRIZHAK, 2017).

O processo para produção de CDR consiste em eliminar a fração não combustível, reduzindo o tamanho das partículas e o teor de umidade, proporcionar a homogeneização dos resíduos e, em alguns casos, sua transformação em *pellets* ou *briquetes* (GALLARDO et al., 2014), pequenos cilindros compactos contendo os resíduos homogeneizados. As etapas do processo produtivo do CDR são: separação na fonte, separação ou classificação mecânica, redução de tamanho, separação e peneiramento, mistura, secagem e peletização (KARA, 2012). Após as etapas de segregação e classificação, o resíduo é tratado em um pré-triturador seguido pelo triturador magnético. Posteriormente é encaminhado para um separador balístico, com o intuito de retirar os resíduos de baixo poder calorífico. O restante do material é triado para remover metais, as frações inertes, como vidro, por exemplo, e a fração orgânica que possa existir (KARA, 2012).

Uma composição ideal de CDR é aquela que apresenta resíduos com alto poder calorífico, contendo alto teor de plásticos, papel, papelão, embalagens poliméricas, têxteis e madeira, pois possuem em sua composição compostos biogênicos que ao mesmo tempo elevam o poder calorífico do combustível e contribuem para a redução de emissões de CO₂ (BRÁS et al., 2017). Como a composição e as propriedades do CDR podem variar significativamente de um local para outro, devido às características do resíduo utilizado, os impactos ambientais e as considerações econômicas associadas à produção e aplicação do CDR também podem ser diversos (REZA et al., 2013).

Para uma produção com valores relativamente estáveis, os rejeitos utilizados para a produção de CDR precisam ser secos, separados e homogêneos, sendo que tal processo maximiza os benefícios relacionados ao poder calorífico obtido (ZHAO et. al, 2016). Da mesma forma, um preparo prévio dos rejeitos é necessário para que o CDR seja queimado de forma eficaz, tendo como objetivo a redução da granulometria e a remoção de materiais que possam prejudicar o valor energético, tais como materiais não combustíveis e que contenham altos teores de umidade, como os resíduos orgânicos, por exemplo (BRÁS et. al, 2017).

As principais vantagens do uso de CDR são uma significativa redução do volume dos resíduos, o aproveitamento do valor energético e os baixos custos de produção (GALLARDO et al., 2014; BRÁS et al., 2017).

O CDR é comercializado e utilizado em instalações para geração de energia ou em processos produtivos que necessitam de calor. Abrange uma ampla gama de materiais que são processados para atender às diretrizes e especificações do setor em que será utilizado, principalmente no que diz respeito ao poder calorífico (GALLARDO et al., 2014). Muitos autores concordam que os principais usuários do CDR são as indústrias de cimento e energia, assim como caldeiras industriais (NITHIKUL; KARTHIKEYAN; VISVANATHAN, 2011).

Em geral, o CDR pode ser utilizado como fonte de energia para diversos processos produtivos, tais como: conversão térmica integrada, co-combustão em caldeiras a carvão, co-processamento em fornos de cimento e co-gaseificação com carvão ou biomassa (REZA et al., 2013). Independente do processo produtivo e do setor em que o CDR for utilizado, alguns requisitos gerais de qualidade devem ser observados para garantir a segurança e a eficiência da sua aplicação, tais como: poder calorífico bem definido, baixo teor de cloro, composição controlada da qualidade (poucas impurezas), tamanho do grão bem definido, densidade aparente definida e disponibilidade de quantidades suficientes com as especificações exigidas (SARC; LORBER, 2013).

Fornos de cimento são um dos melhores lugares para a recuperação de energia do CDR (GENON; BRIZIO, 2008; KARA, 2012). Desta forma, as principais características para os padrões de qualidade do CDR são articulados com base nas demandas da indústria de cimento (SHUMAL et al, 2020). O principal problema da utilização de CDR em fornos de cimento é o teor de cloro, pois quando o mesmo é alto pode enfraquecer o concreto em termos de resistência de 2, 7 e 28 dias (BRÁS et al., 2017).

A classificação do CDR leva em consideração três parâmetros estratégicos: Poder Calorífico Inferior (Parâmetro comercial), teor de cloro (parâmetro que interfere no processo) e teor de mercúrio (parâmetro de interesse ambiental) (PAOLO; PAOLA, 2015). Um alto teor

de umidade influencia negativamente no poder calorífico inferior e, conseqüentemente, provoca uma redução na eficiência da combustão, além de influenciar na emissão de gases como monóxido de carbono, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio (BRÁS et al., 2017).

3.4.1 Tipos e Classes de CDR

Reza et al. (2013), com base na norma ASTM E856-83 (*Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel*), expõe sete diferentes categorias que o CDR pode ser classificado. Os valores de Poder Calorífico, cloro e mercúrio foram retiradas da página da *European Recovered Fuel Organisation – ERFO*. São elas:

- CDR-1: Resíduos utilizados na forma de descarte; Poder calorífico inferior maior que 25 MJ/kg; Teor de cloro menor que 0,2%; teor de mercúrio menor que 0,04 mg/MJ;
- CDR-2: Também chamado de RDF grosso, são os resíduos processados para granulometria grossa com ou sem separação de metais ferrosos, de modo que 95% em peso passe por uma malha quadrada de 6 polegadas; Poder calorífico líquido maior que 20 MJ/kg; Teor de cloro menor que 0,6%; teor de mercúrio menor que 0,06 mg/MJ;
- CDR-3: Também chamado de CDR *Fluff*, são os resíduos processados para separar vidro, metal e materiais inorgânicos, posteriormente triturados de modo que 95% em peso passe através de malha quadrada de 2 polegadas; Poder calorífico líquido maior que 15 MJ/kg; Teor de cloro menor que 1,0%; teor de mercúrio menor que 0,16 mg/MJ;

Figura 1 - Exemplo de CDR do tipo *Fluff*.



Fonte: Figura da autora (2021).

- CDR-4: Também chamado de CDR em pó, são os resíduos combustíveis transformados em pó, de modo que 95%, em peso, passem através de uma malha 10 (0,035 polegadas); Poder calorífico líquido maior que 10 MJ/kg; Teor de cloro menor que 1,5%; teor de mercúrio menor que 0,30 mg/MJ;
- CDR-5: Também chamado de CDR densificado, são os resíduos combustíveis comprimidos sob a forma de pellets (peça arredondada e comprimida), slugs (peças alongadas e geralmente arredondadas), cubetas ou briquetes; Poder calorífico líquido maior que 3 MJ/kg; Teor de cloro menor que 3,0%; teor de mercúrio menor que 1,0 mg/MJ;
- CDR-6: São os resíduos combustíveis transformados em combustíveis líquidos;
- CDR-7: São os resíduos combustíveis transformados em combustíveis gasosos.

Além disto, os CDRs podem ser classificados de acordo com sua forma de produção. De acordo com Pinto (2009), a qualificação quanto à forma possui três categorias:

- Fluff – Possui baixa densidade, material solto. Devido às suas características, é facilmente transportado pelo ar e, por isso, necessita de armazenamento adequado;
- Pellets – CDR produzido a partir da aglomeração dos materiais que estavam soltos na forma de cubo, disco ou cilindro. Geralmente, possui dimensão inferior a 25 mm;

- Briquette – tal como os pellets, também é produzido através de aglomeração de materiais soltos, porém é produzido em blocos ou cilindros com dimensão superior a 25 mm.

3.4.1.1 Diferenças conceituais sobre CDR

Em referências bibliográficas de outros países, principalmente da União Europeia, existem informações acerca de RDF – *Recovery Derived Fuels* (Combustíveis Derivados de Recuperação) e SRF – *Solid Recovered Fuels* (Combustíveis Sólidos Recuperados). A diferença primordial entre eles é que o combustível chamado de RDF possui um bom poder calorífico e baixo teor de cloro, entretanto não é produzido de forma padronizada. O combustível chamado de SRF é produzido de acordo com a norma EN 15359:2011 – *Solid Recovered Fuels – Specifications and classes*, que especifica principalmente o poder calorífico, teor de cloro e mercúrio, proporcionando uma classificação deste tipo de combustível, além de ser produzido a partir de resíduos não perigosos.

No Brasil não existe esta diferenciação, entretanto pode-se inferir que o termo CDR está associado ao SRF, uma vez que para ser utilizado, principalmente em fornos de produção de clínquer, é necessária uma padronização em termos de Poder Calorífico, teor de cloro e teor de mercúrio, por exemplo.

3.4.2 Contexto Legal para a Utilização de CDR

3.4.2.1 No Brasil

Desde a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o Brasil tem evoluído significativamente no que diz respeito à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Neste sentido, a PNRS também trata sobre a recuperação energética dos resíduos, em seu Art. 9º, § 1º, expõe que “Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental” (BRASIL, 2010).

Com o amparo legal proporcionado pela PNRS, diversos estados do Brasil criaram suas próprias leis e normativas técnicas sobre tratamento térmico de resíduos e co-processamento. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) também possui algumas

Resoluções tratando do tema. O Quadro 2 demonstra as normativas existentes no país relacionadas ao aproveitamento energético de resíduos sólidos e coprocessamento em fornos de produção de clínquer.

Quadro 2 - Normativas brasileiras sobre tratamento térmico de resíduos, coprocessamento para produção de clínquer e emissões de poluentes atmosféricos.

Legislação	Conteúdo
Resolução CONAMA nº 264 de 26 de agosto de 1999	Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos
RESOLUÇÃO CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
Resolução CONAMA nº 382 de 26 de dezembro de 2006	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
Resolução CONAMA nº 436 de 26 de dezembro de 2011	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.
Minas Gerais – Deliberação Normativa DN 154 de 25 de agosto de 2010	Dispõe sobre o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer.
Rio Grande do Sul – Resolução CONSEMA 02 de 17 de abril de 2000	Dispõe de norma sobre o licenciamento ambiental para co-processamento de resíduos em fornos de clínquer
São Paulo – CETESB Norma Técnica P4-263 de dezembro de 2003	Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer
Paraná – Resolução SEMA nº 76 de 30 de novembro de 2009	Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.
São Paulo – Resolução SIMA nº 38 de 31 de maio de 2017 ¹	Estabelecem diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos – CDRU em Fornos de Produção de Clínquer.
SÃO PAULO. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA). Resolução nº 047 de 6 de agosto de 2020.	Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos -CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR
ABNT – NBR 16.849 de 10 de fevereiro de 2020	Estabelece os requisitos para aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos classe II – não perigosos, abrangendo os aspectos de elegibilidade de resíduos, registros e rastreabilidade, amostragem e formação dos lotes, armazenamento, preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), classificação dos lotes gerados e uso do RSU nas unidades de recuperação energética (URE), conforme a cadeia de custódia descrita na norma, respeitando a hierarquia de gestão e gerenciamento de resíduos.
Resolução CONAMA nº 499 de 6 de outubro de 2020	Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir de fevereiro de 2020 o Brasil passou a contar com uma norma específica a respeito dos requisitos de uso para resíduos sólidos urbanos com fins energéticos. A norma tem o objetivo de promover uma utilização segura e sustentável dos RSU, aumentando a confiabilidade das práticas de recuperação energética (ABNT, 2020). Em seu item 7.1 a norma

¹ Primeira legislação brasileira específica sobre co-processamento de CDR a partir de RSU para produção de clínquer.

supracitada expõe os limites para classificação dos RSU com fins energéticos, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Limites para classificação dos RSU com fins energéticos.

Unidade	Medida Estatística	Classes		
		P1	P2	P3
PCI (base seca)				
kcal/kg	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 ($P \geq 95\%$)	$Cl \leq 0,5$	$0,5 < Cl \leq 1,5$	$1,5 < Cl \leq 3,0$
Teor de mercúrio				
mg/kg	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).

3.4.2.2 Combustível Derivado de Resíduos em Outros Países

A utilização de Combustíveis Derivados de Resíduos é amplamente difundida mundialmente, principalmente devido à hierarquia dos resíduos, a qual menciona a recuperação energética dos resíduos após as etapas de redução, reutilização e reciclagem e que antecede ações de incineração e disposição final em aterros sanitários. A União Europeia possui um conjunto de normativas que padronizam os requisitos de qualidade, métodos de amostragem e as especificações de cada tipo de CDR, sendo que cada país tem suas normativas nacionais baseadas nos padrões europeus desenvolvidos pela Comissão Europeia de Padronização.

Quadro 4 - Normativas estrangeiras sobre Combustíveis Derivados de Resíduos.

Legislação	Conteúdo
EN 15357:2011	Solid recovered fuels – Terminology, definitions and descriptions
EN 15358: 2011	Solid recovered fuels – Quality management systems
CEN/TR 15441:2006	Solid recovered fuels – Guidelines on occupational health aspects
EN 15590:2011	Solid recovered fuels – Determination of potential rate of microbial self heating using the real dynamic respiration index (not under mandate)
CEN/TR 15508:2006	Key properties on solid recovered fuels to be used for establishing a classification system
EN 15359:2011	Solid recovered fuels – Specifications and classes
CEN/TR 14980:2004	Solid recovered fuels – Reporto n relative difference between biodegradable and biogenic fractions pf SRF
CEN/TR 15591:2007	Solid recovered fuels – Determination of the biomass content based on the 14C method
EN15440:2011	Solid recovered fuels – Method for the determination of biomass content
EN15442:2011	Solid recovered fuels – Methods for sampling
EN15443:2011	Solid recovered fuels – Methods for the preparation of the laboratory sample
EN15413:2011	Solid recovered fuels – Methods for the preparation of the test sample from the laboratory sample
CEN/TR 15716:2008	Solid recovered fuels – Determination of combustion behaviour (not under mandate)
EN15400:2011	Solid recovered fuels – Determination of calorific value

Legislação	Conteúdo
CEN/TS 15401:2010	Solid recovered fuels – Determination of bulk density
EN15402:2011	Solid recovered fuels – Determination of content of volatile matter
EN15403:2011	Solid recovered fuels – Determination of ash content
CEN/TR 15404:2010	Solid recovered fuels – Methods for the determination of ash melting behaviour by using characteristic temperatures
CEN/TS 15405:2010	Solid recovered fuels – Determination of density of pellets and briquettes
CEN/TS 15406:2010	Solid recovered fuels – Determination of bridging properties of bulk material
CEN/TS 15414:2010	Parte 1: Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Determination of total moisture by a reference method
	Parte 2: Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Determination of total moisture by a simplified method
EN15414-3:2011	Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Moisture in general analysis sample
EN15415-1:2011	Solid recovered fuels – Determination of particle size distribution – Part 1: Screen method for small dimension particles
CEN/TS 15639:2010	Solid recovered fuels – Determination of mechanical durability of pellets
CEN/TS 15412:2010	Solid recovered fuels – Methods for the determination of metallic aluminium FprEN Solid recovered fuels 15415-2:2012 – Determination of particle size distribution – Part 2: Maximum projected length method (manual) for large dimension particles
15415-3:2012	Determination of particle size distribution – Part 3: Method by image analysis for large dimension particles
EN15407:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content
EN15408:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content
EN 15410:2011	Solid recovered fuels – Method for the determination of the content of major elements (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti)
EN15411:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn)
NP 4486:2008	Norma Portuguesa sobre combustíveis derivados de resíduos produzidos a partir de resíduos não perigosos para utilização em unidades licenciadas para incineração ou co-incineração.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.5 INDÚSTRIA DE CIMENTO E COPROCESSAMENTO

3.5.1 Processo Produtivo

O cimento é um ingrediente essencial para construções necessárias à humanidade, tais como a edificação de moradias e obras de infraestrutura, exercendo papel vital na indústria da construção global (GEORGIPOULOU; LYBERATOS, 2018). Ao mesmo tempo que representa uma indústria importante, também apresenta significativo consumo de energia, de recursos e causa impactos ambientais importantes. “É responsável por quase 5-7% das emissões globais de CO₂, emissões antropogênicas totais de CO₂ e emissões substanciais de SO₂, NO_x e outros poluentes” (GEORGIPOULOU; LYBERATOS, 2018). Desta maneira, cabe a necessidade de compreender o processo produtivo convencional do cimento e como este pode ser melhorado para diminuir os impactos ambientais.

Os fornos de cimento usam diferentes fontes de energia para produzir as altas temperaturas requeridas para a formação do clínquer. As fontes de combustível mais comuns para a indústria de cimento são: carvão, óleo combustível, coque de petróleo, gás natural, diesel (MADLOOL et al. 2011). Na indústria cimenteira do Brasil, principalmente depois do ano 2001, o principal combustível utilizado no processo produtivo é o coque de petróleo (EPE, 2020). No ano de 2019 foram consumidas 2.752.000 toneladas equivalentes de petróleo em coque de petróleo pelo setor, o que representou 70,6% do total de combustíveis utilizados (EPE, 2020).

Além destas, os combustíveis alternativos também são uma das fontes de energia utilizadas por muitas indústrias de cimento em todo o mundo, sendo que estes combustíveis devem ter um conteúdo químico adequado dependendo do tipo de componentes e do seu conteúdo orgânico (MADLOOL et al. 2011). O uso de combustíveis alternativos nas linhas de calcinadores começou em meados da década de 1980 e foi rapidamente incorporado ao estágio de pré-calcinadores (GEORGIPOULOU; LYBERATOS, 2018). No processo produtivo do cimento os combustíveis são necessários para gerar energia térmica durante o processo de calcinação no pré-calcinador e durante o processo de clinquerização no forno rotativo (RAHMAN et al, 2013).

A matéria prima principal para a produção de clínquer é a farinha crua, cujos componentes são os óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro. O cálcio é proveniente principalmente de matérias primas como o calcário. A sílica, alumínio e ferro são oriundos da argila, xisto e outros materiais (KARA, 2012).

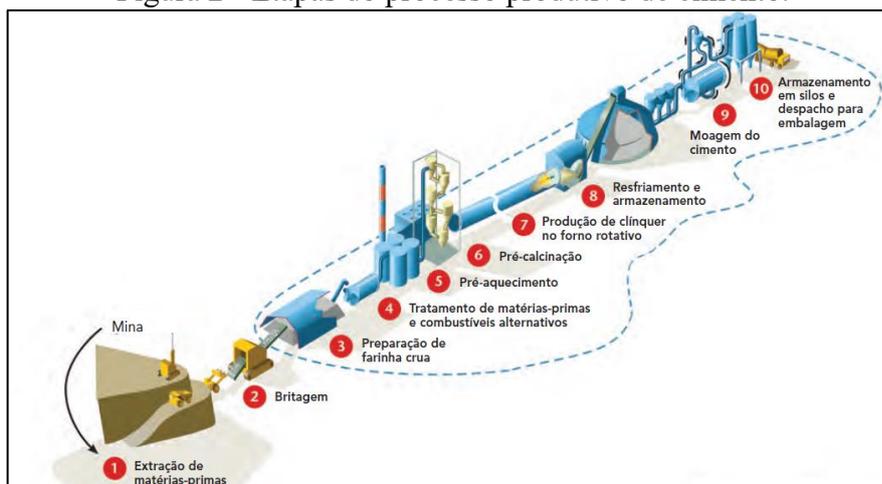
O processo produtivo do cimento inclui basicamente a extração de calcário, preparação da farinha crua, passagem pelo forno, resfriamento do clínquer, moagem, armazenamento e expedição (RAHMAN et al, 2013). O calcário utilizado na produção de cimento possui entre 75 e 90% de carbonato de cálcio (CaCO_3), enquanto o restante é composto por carbonato de magnésio (MgCO_3) e impurezas (MADLOOL et al. 2011).

Após a mineração do calcário, principal matéria-prima do cimento, calcário, sílica, alumínio e óxidos de ferro são triturados e misturados para a produção da farinha crua (RAHMAN et al, 2013; MADLOOL et al. 2011). A cal e a sílica fornecem a principal resistência do cimento, enquanto o ferro reduz a temperatura da reação e confere ao cimento sua característica cor cinza (MADLOOL et al. 2011).

Esta mistura passa por um forno a cerca de 900°C onde ocorre a decomposição do CaCO_3 para gerar óxido de cálcio (CaO , cal) e liberar CO_2 , no processo conhecido como calcinação (RAHMAN et al, 2013; MADLOOL et al. 2011). Em seguida inicia-se o processo

chamado de clinquerização, no qual o óxido de cálcio reage a altas temperaturas (entre 1400 e 1500°C) com sílica, alumina e óxido ferroso para formar os silicatos e aluminatos, respectivamente, que formam o clínquer (RAHMAN et al, 2013). Posteriormente, o clínquer produzido é moído juntamente com gesso e outros aditivos, que dependem do tipo de cimento requerido, para produzir o cimento (RAHMAN et al, 2013). A Figura 2 demonstra as etapas do processo produtivo.

Figura 2 - Etapas do processo produtivo de cimento.



Fonte: VISEDO, PECCHIO, 2019.

As reações químicas iniciam-se juntamente com o aumento da temperatura e em diferentes intervalos, conforme pode ser observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Principais reações do processo de clinquerização, dividido por faixas de temperatura.

Temperatura (°C)	Reação
100-200	Liberação de água livre
500-700	Desidroxilação dos argilominerais; Transformação de quartzo- α em quartzo- β
700-900	Decomposição dos carbonatos e liberação de CO_2 ; Formação de aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos [C_{12}A_7 e $\text{C}_2(\text{AF})$] e início da formação de belita ($2\text{CaO} + \text{Si} \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$); Conversão de quartzo- β em cristobalita
900-1200	Conversão de ferroaluminatos em C_4AF em C_3A ; Formação de belita a partir da sílica restante e dos cristais de cal livre
1200-1350	Cristalização das primeiras alitas a 1200°C, a partir de cristais pré-existent de belita e cal livre ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaO} \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5$); Formação da fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos a partir de 1280°C, com nodulização do clínquer;
>1350	Desenvolvimento dos cristais de alita.

Fonte: Gobbo, 2003.

Para o controle da farinha crua, do clínquer e para manter a produção de cimento o mais homogênea possível visando a qualidade alguns parâmetros químicos são utilizados. Entre os parâmetros mais utilizados pela indústria brasileira, pode-se citar o Fator de Saturação de Cal (FSC), o Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA), sendo que as equações

podem ser observadas no Quadro 6 abaixo, juntamente com os valores ideais para o controle da qualidade.

Quadro 6 - Principais parâmetros químicos utilizados para controle de qualidade do clínquer e valores ideais.

Parâmetro	Equação	Valores ideais
FSC	$\frac{1000\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3}$	88-98
MS	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	2,4-3,7
MA	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	1,4-1,6

Fonte: Gobbo, 2003.

A qualidade do clínquer é altamente dependente da homogeneização de pellets com combustível e do suprimento de ar, sendo que o suprimento inadequado de ar ou sua distribuição irregular tornam a combustão incompleta, resultando em clínquer de baixa qualidade e altas emissões de monóxido de carbono (CO) e carbono orgânico volátil (COV) (MADLOOL et al. 2011). O produto final também sofre influência do tamanho das partículas, tanto no processo após a moagem da farinha crua quanto no cimento produzido, quanto mais uniformes são as partículas, melhor a qualidade, o que resulta em economia de combustível no forno (MADLOOL et al. 2011).

Para medir o desempenho do processo de fabricação, várias empresas utilizam indicadores-chave de desempenho, os quais podem ser categorizados por eficiência energética, desempenho ambiental, benefícios econômicos, desempenho social, etc (RAHMAN, 2013). Os indicadores mais importantes são:

- Toneladas de cimento por megajoule de energia;
- Taxas de substituição de combustíveis e de matérias-primas;
- Quantidade de resíduo por tonelada de cimento;
- Dióxido de carbono (CO₂) líquido por tonelada de cimento;
- Taxa de incidentes (doenças, lesões, etc) por tonelada de cimento.

Os principais impactos ambientais da produção de cimento estão associados com os processos intensivos de utilização de energia e emissões atmosféricas, onde o dióxido de carbono é responsável por aproximadamente 6% do total de emissões de fontes estacionárias em todo o mundo (GÜERECA; TORRES; JUÁREZ-LÓPEZ, 2015).

3.5.2 Indústria do Cimento e Emissões de Poluentes

A produção de clínquer é um processo que consome grandes quantidades de energia e gera muitas emissões de carbono. O principal componente do clínquer, óxido de cálcio (CaO), é encontrado ligado ao dióxido de carbono (CO₂) na forma de CaCO₃ (STRAZZA et al., 2011). O processo para formação do CaO gera cerca de 60% das emissões diretas de CO₂ provenientes da fabricação de cimento, enquanto a parcela remanescente está na utilização dos combustíveis fósseis para o fornecimento da energia térmica necessária para todas as reações químicas da descarbonatação do CaCO₃ (STRAZZA et al., 2011).

Além das emissões de dióxido de carbono, a produção de cimento também pode liberar outras substâncias poluentes, tais como: poeiras minerais, óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂) (STRAZZA et al., 2011). As poeiras minerais são emitidas no forno e também podem ser liberadas durante o manuseio, transporte e armazenamento das matérias-primas, do clínquer e do cimento (STRAZZA et al., 2011). Os NO_x são produzidos pela oxidação de compostos de nitrogênio presentes no combustível e pelo nitrogênio no ar de combustão a altas temperaturas para produção do clínquer (STRAZZA et al., 2011). O SO₂ provém de matérias-primas ou combustíveis que contém enxofre em sua composição (STRAZZA et al., 2011).

Quanto à contribuição específica da combustão de resíduos, pode ocorrer a formação de dioxinas que podem derivar de materiais específicos presentes em um grau significativo nos materiais combustíveis (GENON; BRIZIO, 2008). A concentração de enxofre no CDR é geralmente muito menor do que o valor de referência nos combustíveis fósseis convencionais (0,1-0,2% em CDR, 3-5% em combustíveis fósseis). Portanto, quaisquer problemas relacionados à precipitação ou obstrução podem ser excluídos, embora problemas de sequestro e transferência de álcalis no clínquer devam ser verificados (GENON; BRIZIO, 2008). A ação combinada de fabricar cimento conjuntamente com a queima de resíduos é conhecida como coprocessamento, processo que reaproveita a fração mineral e o valor energético dos resíduos, em substituição a combustíveis fósseis não renováveis (VISEDÒ, PECCHIO, 2019).

A utilização de CDR pode levar a um aumento da concentração de cloro em relação aos combustíveis convencionais (0,3-0,5% em CDR e 0,1% em coque de petróleo) o que pode causar problemas decorrentes das reações químicas entre álcalis e cloro, volatilização de cloretos e a necessidade de operar um desvio (extração de parte do gás de combustão) para limitar os cloretos no clínquer final (GENON; BRIZIO, 2008). As emissões de mercúrio em plantas de cimento são significativas e foram estimadas em cerca de 5,6% do total de emissões de mercúrio de fontes antropogênicas globais (MLAKAR et al., 2010). Estando presente na produção de clínquer sob diferentes formas, o mercúrio das matérias-primas é transformado na forma gasosa em temperaturas entre 200 e 700 °C (MLAKAR et al., 2010).

Os custos com energia e as preocupações com a questão ambiental tem motivado as cimenteiras ao redor do mundo a buscar materiais que possam substituir os combustíveis convencionais, tais como resíduos de plásticos e papéis não recicláveis, pneus usados, resíduos de biomassa e lodos de esgoto (CHATZIARAS, PSOMOPOULOS, THEMELIS, 2016). As emissões potenciais provenientes de fábricas de cimento incluem, dentre outras: poeiras, óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), dioxinas e furanos, óxidos de carbono (CO e CO_2), compostos orgânicos voláteis, ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF) e metais pesados (GIZ, 2017).

Na indústria de cimento europeia, a taxa de substituição térmica de combustíveis tradicionais por resíduos chega até 80%, em média anual, em determinadas instalações, enquanto na união europeia em geral a substituição média gira em torno de 39%, impactando diretamente na quantidade de emissões atmosféricas (GIZ, 2017). No Brasil, em 2019, foi publicado o Roadmap Tecnológico do Cimento, cujo objetivo principal é orientar a indústria cimenteira do país para a redução das emissões atmosféricas em 33% até o ano de 2050 (VISED, PECCHIO, 2019). Para que o objetivo seja alcançado, foram estipulados quatro pilares: I) Adições e substitutos de clínquer por meio do uso de subprodutos de outras atividades; II) Combustíveis alternativos, com a utilização de materiais que possuam potencial energético condizente para a substituição dos combustíveis fósseis não renováveis; III) Medidas de eficiência energética; e IV) Investimento em tecnologias inovadoras e emergentes, tais como a captura de carbono (VISED, PECCHIO, 2019).

No Brasil, cerca de 36% das emissões totais de CO_2 são provenientes da queima de combustíveis nos fornos de alta temperatura de produção de clínquer e os outros 63% são emissões proveniente do processo de calcinação, reação química que ocorre na conversão de calcário em óxido de cálcio (VISED, PECCHIO, 2019).

3.5.3 Utilização do CDR em Fornos de Cimenteiras

O forno rotativo usado na indústria do cimento é capaz de queimar uma ampla gama de materiais devido ao longo tempo de exposição a altas temperaturas, capacidade do clínquer de absorver e bloquear contaminantes e a alcalinidade do ambiente do forno (RAHMAN, 2013). Como a produção de clínquer é um processo contínuo, requer um fornecimento ininterrupto de combustível que pode ser suprido por combustíveis fósseis ou parcialmente substituído por meio de uma entrada permanente de CDR através de coprocessamento. Assim, o valor pode ser adicionado aos resíduos e o impacto ambiental dos aterros sanitários pode ser evitado através

dos processos do forno e processos de refino, além da minimização do uso de combustíveis fósseis e a maximização da recuperação de energia (GÜERECA; TORRES; JUÁREZ-LÓPEZ, 2015; STRAZZA et al., 2011). Um requisito importante a ser levado em consideração é que a qualidade do cimento e sua compatibilidade com o meio ambiente não deve diminuir com a utilização do CDR (MADLOOL et al., 2011).

Enquanto ocorre um processo de tratamento e reciclagem de resíduos eficiente, seguro e econômico, através do coprocessamento destes como combustíveis alternativos ou substitutos de matérias-primas, proporciona-se um balanço ambiental global mais favorável (GIZ, 2019). A utilização de combustíveis alternativos não tem influência negativa nos valores de emissão de poluentes, sendo que em alguns casos estas emissões resultam abaixo dos limites legalmente estabelecidos para combustíveis tradicionais (STRAZZA et al., 2011).

Como a indústria de produção de cimento caracteriza-se pelos altos impactos ambientais durante todo o processo, a utilização de CDR também está associada ao desenvolvimento sustentável inserido nas estratégias de negócios dos fabricantes e desenvolvimento de produtos com menores impactos ambientais (STRAZZA et al., 2011). O uso de CDR, em conformidade com os valores normativos e procedimentos de fiscalização, pode reduzir os custos de combustível e contribuir para a proteção ambiental, diminuindo a quantidade de combustível fóssil necessária para produzir cimento (STRAZZA et al., 2011).

Devido à natureza heterogênea e a quantidade relativamente alta de umidade presente nos RSU, os fornos de cimento não podem queimar RSU não triados, pois isso pode afetar a qualidade dos produtos do cimento e ocasionar danos ambientais (REZA et al., 2013). Sendo assim, os fornos de cimento requerem materiais de composição homogênea em forma, tamanho e no poder calorífico (REZA et al., 2013). Segundo Samolada e Zabaniotou (2014), a aplicação de uma análise SWOT (pontos fortes, pontos fracos, oportunidades, ameaças) comprovou os benefícios do uso do CDR em fornos de produção de clínquer em comparação com a construção de novas usinas de combustão para produção de eletricidade. A alimentação do queimador principal de um forno de produção de clínquer com combustível alternativo, como é o caso do CDR, exige que o tamanho da partícula seja inferior a 10 mm, enquanto para a alimentação do pré-calcinador o tamanho da partícula deve ser inferior a 100 mm, preferencialmente com uma geometria bidimensional (GARCÉS et al., 2016).

O principal impacto negativo associado ao uso de CDR na produção de cimento é a emissão de poluentes atmosféricos a partir da composição bruta do CDR, cuja transferência de substâncias contidas nos resíduos para a atmosfera ou para o clínquer produzido é uma possibilidade a ser considerada (GENON; BRIZIO, 2008).

Entre os anos de 2000 e 2014 a indústria cimenteira ampliou de 9 para 15% a participação de combustíveis alternativos em sua matriz energética, sendo que em 2014 foram utilizados 1,5 milhão de toneladas de resíduos e biomassas nas fábricas de todo o Brasil (VISED, PECCHIO, 2019). O cenário para os próximos anos é de crescimento na utilização de resíduos na forma de CDR para coprocessamento em fornos de cimenteiras, com principal incentivo proveniente da edição da Norma Brasileira ABNT 16.849/2020 que versa sobre resíduos sólidos urbanos para fins de recuperação energética.

Os materiais de entrada para a produção de CDR são fundamentais para sua qualidade, sendo que a remoção de materiais como resíduos orgânicos, metais e vidros contribuem significativamente para as características do CDR em termos de poder calorífico e elementos contaminantes (BESSI et al., 2016). Sendo assim, devido a natureza heterogênea e os teores de umidade relativamente altos, a indústria cimenteira não utiliza resíduos como combustível que não estejam previamente segregados de acordo com as frações mais interessantes, pois isso pode afetar a qualidade dos subprodutos e causar problemas ambientais (REZA et al., 2013).

A qualidade do CDR produzido por ser melhorada através da utilização de apenas frações combustíveis (embalagens de plástico, papel, têxteis, etc.) e a remoção de contaminantes físicos (vidros, metais ferrosos e não ferrosos, pedras), proporcionando uma diminuição no teor de umidade, no teor de cinzas e um aumento do poder calorífico (VELIS et al., 2010; NASRULLAH et al., 2015; ARINA et al., 2020). Tal afirmativa suporta a criação de uma triagem, mecânica ou manual, após a triagem atualmente praticada em Associações de Catadores de Materiais Recicláveis, criando uma linha de produção para matéria-prima a ser utilizada como CDR.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Florianópolis possui uma área de 675 km² e conta com uma população estimada de 500.973 habitantes (IBGE, 2019) distribuídos em 85 bairros. Localiza-se no litoral do estado de Santa Catarina e apresenta economia baseada principalmente no setor de serviços. A empresa responsável pela coleta dos resíduos sólidos é a Autarquia de Melhoramentos da Capital (COMCAP), autarquia de economia mista cujo acionista majoritário é a Prefeitura Municipal, que realiza além da coleta de resíduos domiciliares, a coleta seletiva de materiais recicláveis, a coleta de resíduo pesado, a remoção de entulho e varrição com caixas estacionárias e caminhão caçamba, a capina mecanizada, a capina manual, a roçagem, a limpeza de canais e valas a céu aberto, além de varrição de ruas, poda de árvores em logradouros públicos, administração de estacionamentos e sanitários públicos, limpezas em eventos promovidos pela Prefeitura e programas de mutirões também desenvolvidos pela Prefeitura.

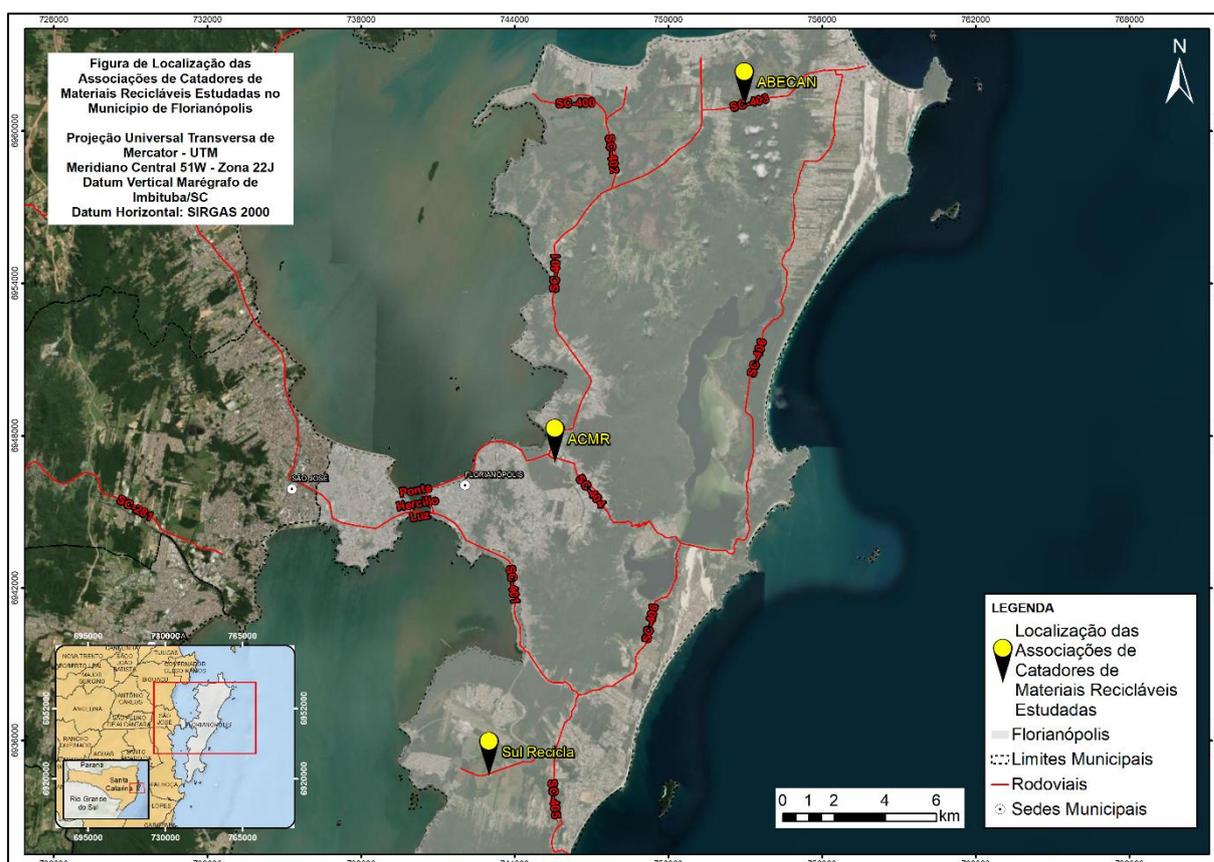
A coleta seletiva é realizada no modelo porta a porta e por meio de PEVs e os resíduos recolhidos são encaminhados para treze Associações de Catadores, sendo sete no município de Florianópolis e seis no município de São José. Desde 2017 foram criadas Associações nas regiões Norte e Sul da Ilha de Florianópolis, com o objetivo de diminuir o trajeto a ser percorrido pelos caminhões entre o roteiro de coleta e o seu destino.

Para a caracterização gravimétrica dos rejeitos das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis, escolheu-se três das sete Associações do município, distribuídas em diferentes regiões da cidade, objetivando verificar as diferenças dos resíduos recicláveis encaminhados para cada região e, conseqüentemente, dos rejeitos. Vale ressaltar que cada uma destas Associações possui modo de organização e funcionamento próprios e, desta forma, os resíduos comercializados em cada uma variam, alterando também o que é considerado rejeito.

Dentre as Associações listadas, a ACMR é que recebe resíduos recicláveis em maior quantidade, cerca de 60% do total do município, por se tratar de um barracão com maior estrutura, em local relativamente central da cidade e com maior número de colaboradores. Para o ano de 2020 em diante os resíduos coletados nas regiões norte e sul são direcionados diretamente para Associações nestas regiões. Sendo assim, para a realização desta pesquisa foram coletadas amostras de rejeitos na ACMR, localizada no bairro Itacorubi, Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Materiais Recicláveis Sul Recicla – Sul Recicla, localizada no bairro

Tapera e Cooperativa de Trabalho Beneficente de Coletores de Materiais Recicláveis Renascer 4R – Renascer, localizada no bairro Vargem Grande. As Associações estudadas representam, juntas, cerca de 75% dos resíduos da coleta seletiva do município de Florianópolis. A Figura 3 demonstra a localização geográfica das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis estudadas com relação ao município de Florianópolis.

Figura 3 - Localização das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No ano de 2020 a Associação Renascer recebeu um total de 143.450 kg de resíduos provenientes da coleta seletiva do município de Florianópolis, conforme dados da Divisão de Coleta Seletiva da COMCAP, apresentando, em média, 22.069 kg de resíduos por mês, o que representa 5,43% dos resíduos totais da coleta seletiva de Florianópolis. No ano de 2020 a Sul Recicla recebeu um total de 250.300 kg de resíduos provenientes da coleta seletiva do município de Florianópolis, conforme dados da Divisão de Coleta Seletiva da COMCAP. A média de resíduos encaminhados por mês para a Sul Recicla foi de 38.508 kg de resíduos, o que representa 9,48% dos resíduos totais da coleta seletiva de Florianópolis. A ACMR, maior Associação do município, recebeu, em 2020, um total de 6.494.270 kg de resíduos provenientes da coleta seletiva do município de Florianópolis, conforme dados da Divisão de Coleta Seletiva

da COMCAP. A média mensal de resíduos encaminhados para a ACMR foi de 541.189 kg de resíduos, o que representa 56,78% dos resíduos de todo o município de Florianópolis.

4.1.1 Roteiros da Coleta Seletiva

As diferentes regiões e bairros de Florianópolis são cobertas por roteiros pré-determinados de coleta, desenvolvidos para otimizar a maior coleta de resíduos, com um menor tempo de deslocamento na menor distância possível. Tais roteiros são gerenciados pela Divisão de Coleta Seletiva, a qual distribui cada um de acordo com a disponibilidade e a necessidade de cada Associação de Catadores. O conhecimento dos roteiros de coleta faz-se necessário para verificar a origem dos materiais analisados e avaliar a representatividade das amostras analisadas perante o todo.

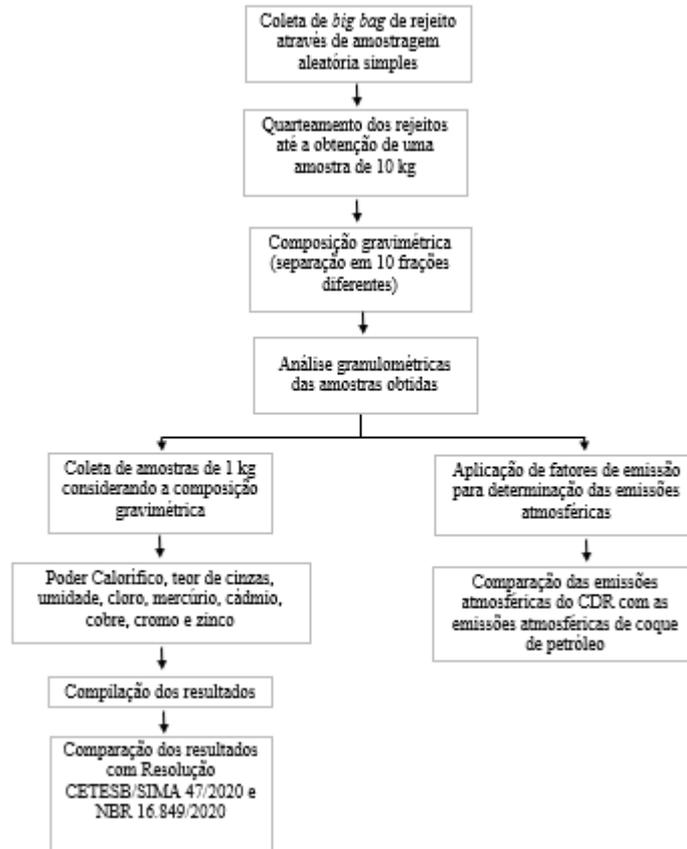
A partir de março de 2020, 52 roteiros de coleta passaram a ser praticados e a análise dos mesmos torna-se relevante para verificar a origem dos resíduos destinados a cada Associação, se ela pode ter alguma relação com a qualidade dos resíduos enviados e, conseqüentemente, com a geração de rejeitos.

Além dos roteiros de coleta frequentemente praticados pela COMCAP, também são encaminhados para as Associações de Catadores os resíduos coletados na rede de ecopontos distribuída pela cidade (Centro de Valorização de Resíduos, no Itacorubi; Canasvieiras, Morro das Pedras e Capoeiras) e provenientes de doações realizadas por grandes geradores de resíduos.

4.2 PROCEDIMENTOS PARA A COLETA DOS DADOS

Para a obtenção dos dados necessários ao desenvolvimento dos objetivos desta pesquisa foram seguidas as seguintes etapas, conforme pode ser verificado na Figura 4 e descrito nos itens posteriores.

Figura 4 - Fluxograma metodológico da obtenção das amostras de rejeitos, análises físico-químicas e emissões atmosféricas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.1 Quantificação dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva

O procedimento metodológico para levantamento da quantidade de resíduos encaminhada para as Associações de Catadores de Materiais Recicláveis de Florianópolis foi a partir de pesquisa documental, a qual diz respeito ao levantamento de dados em arquivos de diversas fontes, tais como órgãos públicos e privados nos quais os dados ainda não receberam um tratamento analítico ou já foram processados e, entretanto, podem ser reanalisados de acordo com o objetivo de uma determinada pesquisa (GIL, 2008).

A pesquisa documental foi efetuada em dados da Divisão de Coleta Seletiva - DVCOS da COMCAP. Esta etapa caracteriza-se como determinante para a compreensão da problemática dos rejeitos nos resíduos da coleta seletiva de Florianópolis, uma vez que o montante gerado é expressivo e são necessárias alternativas para diminuir essa geração ou aproveitar de uma maneira mais eficiente. Buscou-se fazer um levantamento da quantidade de rejeitos gerados mensalmente no município para avaliar se os mesmos seriam suficientes, em quantidade, para suprir total ou parcialmente a demanda por produção de CDR.

Importante destacar que durante toda a pesquisa está sendo utilizado o termo rejeito, porém a definição de rejeito é o resíduo que esgotou todas as suas possibilidades de uso e só pode ser destinado para o aterro sanitário. Neste estudo propõe-se que o que é denominado rejeito em uma Associação de Catadores torne-se resíduo com fins energéticos, portanto, a terminologia correta a ser empregada seria resíduo com fins energéticos. Adotou-se a terminologia rejeitos única e exclusivamente por ser assim chamado nas Associações de Catadores objeto de estudo.

4.2.2 Caracterização Gravimétrica e Granulométrica dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva

Os rejeitos da Associação ACMR são acondicionados em '*big bags*', que possuem capacidade de 1 m³ e 700kg, tendo peso variável dependendo do peso e volume de cada material contido nele. Na Associação Renascer e na Associação Sul Recicla os rejeitos são acondicionados em sacos de lixo de 100 e 200 litros, sendo estocados em local específico para este fim. Sendo assim, para a composição das amostras analisadas na Associação ACMR escolheu-se aleatoriamente um '*big bag*', enquanto nas demais Associações foram escolhidos aleatoriamente três sacos de lixo de locais distintos do local de armazenamento,

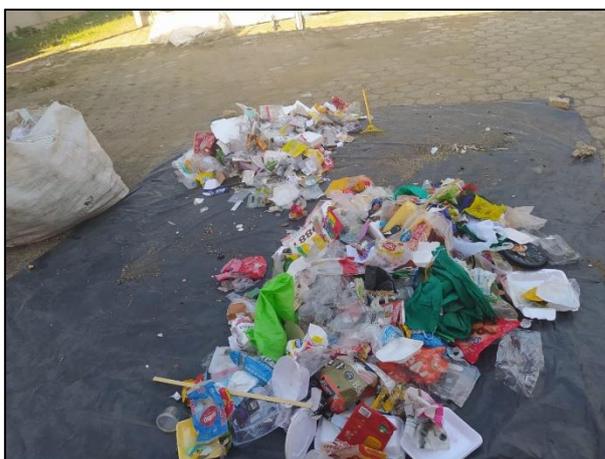
Selecionados os '*big bags*' e sacos de lixo, para a obtenção final das amostras para caracterização física dos rejeitos, foi realizada a técnica do quarteamento, a qual é regulada através da Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT 10.007/2004. O quarteamento consiste em um processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra já homogeneizada, sendo que duas partes opostas entre si são tomadas para constituir uma nova amostra, descartando-se as partes restantes. As partes que restaram são novamente homogeneizadas e o processo se repete, até que o volume requerido seja obtido (ABNT, 2004). O procedimento de quarteamento foi efetuado até que fosse obtida uma amostra de 10 kg (Figura 5 a Figura 8).

Figura 5 – Big bag de rejeitos.



Fonte: Figura da autora (2021).

Figura 7 - Frações opostas descartadas.



Fonte: Figura da autora (2021)

Figura 6 – Rejeitos homogeneizados.



Fonte: Figura da autora (2021).

Figura 8 – Rejeitos segregados em 10 categorias.



Fonte: Figura da autora (2021).

Com a amostra determinada, procedeu-se a separação dos rejeitos em dez diferentes classificações, baseadas no conhecimento empírico da autora, adquirido através de vivências junto a catadores de materiais recicláveis. As classificações são: embalagem metalizada (embalagens de polipropileno biorientado – BOPP); embalagem de macarrão e afins (plásticos coloridos - embalagens de macarrão e de chocolate, por exemplo); embalagem de bolo e afins; embalagens compostas por dois materiais; isopor; roupas e calçados; orgânico; leiteiro (plástico PET1, PP, PEAD); vidros e outros materiais inertes que não foram classificados.

A categoria embalagem metalizada é composta por dois tipos de plástico: outros e o BOPP (película de polipropileno biorientada). O BOPP é o material característico das embalagens de salgadinhos, bolachas, barras de cereais, entre outros. A Figura 9 exemplifica materiais classificados nesta categoria.

Figura 9 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria Embalagem Metalizada.



Fonte: Figura da autora (2021).

A categoria embalagem de macarrão e afins engloba todas as embalagens que não são consideradas recicláveis nas Associações por não possuírem compradores interessados em sua comercialização. Nesta categoria encontram-se os plásticos do tipo outros, principalmente, e o polipropileno em menor proporção. A Figura 10 exemplifica tipos de materiais enquadrados nesta categoria.

Figura 10 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria embalagem de macarrão e afins.



Fonte: Figura da autora (2021).

A categoria embalagens de bolo e afins é composta principalmente por plásticos do tipo 1, os quais tem como características principais serem quebradiços e fazerem barulho ao serem manuseados. Nesta categoria também estão incluídas as embalagens que os catadores chamam de “PET feio”, ou seja, que não é considerado reciclável. A Figura 11 demonstra alguns materiais considerados desta categoria.

Figura 11 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria embalagens de bolo e afins.



Fonte: Figura da autora (2021).

Na categoria dois materiais foram enquadrados os produtos que possuem mais do que um material em sua composição, tais como carteiras de cigarro, embalagens de escova de dentes, embalagens de lâmina de barbear, cartelas de medicamentos, entre outros. Nesta categoria estão os materiais que não são recicláveis justamente por ter mais de um tipo de componente em sua constituição, dificultando o processo de separação e consequente transformação em um novo produto. A Figura 12 demonstra alguns exemplos de rejeitos enquadrados nesta categoria.

Figura 12 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria dois materiais.



Fonte: Figura da autora (2021).

O isopor também foi uma categoria enquadrada para a presente pesquisa, tendo em vista as suas dificuldades para a logística da reciclagem e peculiaridade de composição. O Poliestireno Expandido (EPS), comumente conhecido pelo nome comercial isopor, caracteriza-se por ser um material resistente à compressão, tração e flexão, e com boa capacidade de manter a temperatura dos materiais contidos em suas embalagens (KERBER et al., 2020). Nas Associações objeto de estudo desta dissertação, todas as embalagens de isopor que normalmente são utilizadas para acondicionar alimentos não são consideradas recicláveis, mesmo que limpas, desta forma tornam-se rejeito. Importante frisar que os isopores que protegem itens como geladeiras, por exemplo, são comercializados por todas as Associações estudadas. A Figura 13 exemplifica os diferentes tipos de isopor coletados para a presente pesquisa.

Figura 13 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria isopor.



Fonte: Figura da autora (2021).

Outra categoria coletada para a composição das amostras foi intitulada leitoso. Nela se encontram as embalagens, principalmente potes de iogurte, compostas de poliestireno, cuja reciclagem não é possível por se tratar de um material com muitas pigmentações, as quais prejudicam a qualidade da resina obtida no processo. A Figura 14 retrata alguns materiais enquadrados nesta categoria.

Figura 14 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria leitoso.



Fonte: Figura da autora (2021).

Na composição dos rejeitos das Associação de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis também estão os papeis, os quais são classificados desta maneira principalmente por estarem em pedaços muito pequenos e, portanto, difíceis de segregar, ou por encontrarem-se sujos, o que dificultaria a reciclagem de outros papeis de melhor qualidade. A Figura 15 demonstra alguns papeis identificados nos rejeitos das Associações.

Figura 15 - Exemplos de materiais enquadrados na categoria papel.



Fonte: Figura da autora (2021).

Para completar as dez categorias supramencionadas foram incluídas: roupas e calçados, orgânicos e vidros e restos. Na categoria roupas e calçados, além dos rejeitos que dão o nome à categoria, também foram enquadrados itens como bolsas, mochilas, tapetes, panos e demais materiais que não deveriam estar presentes nos resíduos da coleta seletiva. Na categoria orgânicos foram segregados os restos de alimentos e de podas, enquanto na categoria vidros e restos foram enquadrados os vidros quebrados e materiais que restavam na lona após a realização do quarteamento. Importante ressaltar que estes rejeitos não foram computados para a composição final das amostras de CDR de cada associação, tendo em vista representar significativo acréscimo de umidade, além de materiais que poderiam se degradar e atrair vetores, no caso dos resíduos orgânicos, e por serem inertes, no caso dos vidros.

Com relação ao número de amostras necessárias, a metodologia para análise de resíduos sólidos da Comissão Europeia menciona que uma exploração significativa dos resíduos de uma localidade depende de dois fatores: heterogeneidade dos resíduos, expressa pelo coeficiente natural de variação e a precisão desejada dos resultados (SWA-Tool, 2004).

Em Florianópolis, o coeficiente de variação natural dos rejeitos não era conhecido, sendo assim foi necessária uma amostragem inicial para a definição deste coeficiente e, conseqüentemente, da quantidade de amostras necessárias para que haja um nível de 95% de confiança nos dados obtidos.

Foram realizadas 5 amostragens aleatórias dos rejeitos gerados na Associação ACMR para a determinação do coeficiente natural de variação, entre os dias 25 e 29 de novembro de 2019. Optou-se por esta Associação por ser a maior do município, estar localizada em área central e receber resíduos de todas as regiões de Florianópolis. Após as amostragens obteve-se um desvio padrão entre as categorias variando entre 0,56 e 7,82, com exceção de roupas/calçados e vidros que apresentaram um desvio maior. Como estes elementos apresentaram uma variação maior, foi adotado um coeficiente de variação de 25%. Sendo assim, conforme o estabelecido pela SWA-Tool (2004), para um coeficiente de variação de 25% e nível de confiança de 95% são necessárias 24 amostras de cada associação objeto de estudo.

O estudo de composição gravimétrica teve início na primeira semana do mês de março de 2020 até dezembro de 2020, com coletas de amostras de rejeitos sempre que houvesse montante acumulado que representasse todos os resíduos entregues e triados por cada Associação. Por exemplo, na Associação Renascer os rejeitos são recolhidos pela COMCAP uma vez por semana, ou seja, uma coleta de amostra de rejeitos realizada neste dia representa fielmente os rejeitos gerados naquela semana e contribui para a confiabilidade do estudo.

Semanalmente, a partir das amostras de cada Associação foi realizada a composição gravimétrica do rejeito através da separação manual dos diferentes componentes, os mesmos utilizados na etapa inicial de amostragens. Esta ação teve o objetivo de preparar adequadamente as amostras para posterior mistura e determinação dos componentes químicos, simulando o que acontece no interior de um forno de produção de clínquer.

Importante mencionar que em virtude da pandemia causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), os serviços de coleta seletiva foram suspensos no município e retomados em sua totalidade apenas em junho de 2020. Sendo assim, as amostragens foram pausadas na segunda semana de março de 2020 e retomadas na segunda semana de junho de 2020.

O estudo preliminar de composição granulométrica foi efetuado com uma amostra de cada Associação de Catadores estudada, medindo-se com auxílio de régua de 30 cm as diferentes granulometrias que fazem parte dos resíduos caracterizados. Foram estabelecidos intervalos de 50 mm, iniciando em 50 mm, valor requerido para a utilização direta nos fornos de produção de clínquer, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450

mm e 500 mm. Após segregados, os rejeitos foram pesados em cada categoria para verificar a distribuição granulométrica das amostras.

4.2.3 Caracterização química dos rejeitos presentes na Coleta Seletiva

A caracterização química dos rejeitos é componente determinante para averiguar os processos químicos desencadeados pela queima dos materiais em um forno rotativo de produção de clínquer. Sendo assim, foram analisados: poder calorífico inferior, teor de cinzas, teor de cloro, teor de umidade, teor de mercúrio, cádmio, cobre, cromo e zinco.

A escolha dos parâmetros deve-se aos levantamentos em bibliografia, principalmente artigos de revistas, que mencionavam os parâmetros a serem avaliados para utilização de resíduos como combustível em fornos de produção de clínquer. Além disso, foram elencados parâmetros que podem influenciar na qualidade do cimento, como é o caso do cloro, por exemplo.

Para a realização desta pesquisa, o tipo de CDR foi o *Fluff*, ou seja, CDR produzido a partir de materiais soltos. Optou-se por esta categoria pela pesquisa ser desenvolvida em ambiente laboratorial e, conseqüentemente, não possuir o agravante da dispersão dos materiais através do ar.

4.2.3.1 Preparação de Amostras

Antes da determinação das características químicas do material a ser analisado foi realizada a preparação das amostras. As etapas de preparação seguiram, aproximadamente, o processo produtivo de CDR, que consiste basicamente na retirada de materiais inertes e ferrosos e na trituração dos materiais até a obtenção do tamanho de partícula ideal.

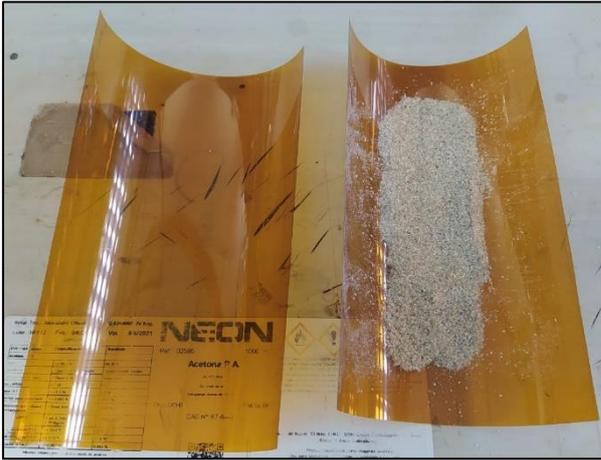
A retirada de materiais inertes e ferrosos foi efetuada manualmente no momento da coleta das amostras nas Associações. Em um processo real, esta etapa seria realizada por meio de triagem automática e separadores magnéticos.

4.2.3.2 Poder Calorífico

Para as amostras que seriam utilizadas para a determinação do poder calorífico em bomba calorimétrica, foram confeccionadas pastilhas com o resíduo moído, visando a

estabilidade das amostras e seu manuseio facilitado. Para isso foi utilizada uma prensa hidráulica P15ST da marca Bovenau (Figura 17). As pastilhas foram produzidas inserindo-se cerca de 2 gramas de cada amostra entre duas fitas de kapton (Figura 16), colocadas na prensa com pressão de 12 toneladas durante 30 segundos.

Figura 16 - Fitas de Kapton com amostra de CDR antes de ser inserida na prensa.



Fonte: A autora.

Figura 17 - Prensa hidráulica utilizada para confecção das pastilhas.



Fonte: A autora.

Para a determinação do Poder Calorífico foi utilizada uma bomba calorimétrica da marca PARR, modelo 6200 (Figura 18).

Figura 18 - Modelo de calorímetro utilizado.



Fonte: Astro34 (2021).

O recipiente calorimétrico é um recipiente metálico dentro do qual é colocada uma determinada quantidade de água na qual a bomba é imersa, além de um agitador e um

termômetro. A água contida neste recipiente é responsável por medir o aumento da temperatura provocado pelo calor transferido da bomba calorimétrica.

De acordo com o manual do usuário da bomba calorimétrica PARR 6200, o invólucro do calorímetro é mantido a uma temperatura constante, enquanto o calor da amostra aumenta a temperatura da bomba e do balde. O fluxo de calor entre o ambiente e o tubo é monitorado por um microprocessador no calorímetro durante o teste, este microprocessador irá determinar continuamente o efeito de qualquer vazamento de calor e, caso necessário, aplicará a correção necessária automaticamente.

O processo de medição do poder calorífico, de acordo com o manual de utilização do equipamento, consiste em:

1. Preparar a amostra e carregar a bomba de oxigênio;
2. Encher o balde do calorímetro primeiro tarando o balde seco em uma solução ou balança; depois adicionar 2000 (+/- 0,5) gramas de água destilada. A temperatura da água deve estar de 3 a 5 °C abaixo da temperatura do balde;
3. O balde deve ser colocado no calorímetro. Em seguida, prender a alça de elevação nos dois orifícios ao lado da tampa e abaixar parcialmente a bomba na água;
4. Empurrar os dois fios do cabo de ignição nos soquetes do terminal no cabo da bomba, orientando os fios para longe do eixo do agitador, evitando que os mesmos fiquem emaranhados no eixo de agitação;
5. Abaixar a bomba completamente na água, encostando na saliência no fundo do balde;
6. Fechar a tampa, pressionar o botão de ligar e deixar o teste ocorrer;

Todas as leituras são automáticas no equipamento e no software dele, sendo que o calor bruto de combustão é calculado através da seguinte equação:

$$H_c = \frac{W * T - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

Onde:

H_c = Calor bruto de combustão;

T = Aumento de temperatura observado;

W = Equivalente energético do calorímetro utilizado;

e₁ = Calor produzido pela queima do nitrogênio aprisionado na bomba para formar ácido nítrico;

e₂ = Calor extra produzido devido à queima de enxofre em trióxido de enxofre e formação de ácido sulfúrico em vez de dióxido de enxofre;

e₃ = Calor produzido pelo fio fusível em chamas;

m = Massa da amostra.

Os resultados foram obtidos através de duplicatas, visando a maior confiabilidade dos resultados, tendo em vista a heterogeneidade dos materiais componentes de cada amostra.

4.2.3.3 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas e umidade das amostras do CDR proposto, as 72 amostras provenientes das Associações de Catadores de Florianópolis foram cortadas com tesoura em tamanhos de partícula de aproximadamente 2 mm (Figura 19), mantidas as proporções da composição gravimétrica inicialmente identificada.

Figura 19 - Exemplo de amostra preparada para determinação do teor de cinzas e umidade.



Fonte: Figura da autora (2021).

Cerca de 0,5 g de amostra foi calcinada em forno mufla em cadinho de porcelana, inicialmente a 550°C, para liberação de materiais combustíveis, passíveis de produção de chama, e mantidos a 775°C por um período de duas horas. O teor de cinzas foi calculado através da equação a seguir.

$$TC = \frac{m_2 - m_1}{m} * 100$$

Onde:

TC = Teor de cinzas, %;

m = Massa da amostra, em gramas;

m_1 = Massa do cadinho vazio, em gramas;

m_2 = Massa do cadinho com a amostra após calcinação, em gramas;

Para a determinação de teor de cinzas foi realizada apenas uma repetição de cada amostra.

4.2.3.4 Teor de umidade

A umidade dos combustíveis influencia diretamente no processo de combustão, sendo assim analisar este parâmetro é de fundamental importância para o controle da quantidade de combustível inserido em um forno de produção de cimento.

A determinação da umidade é realizada através do processo de secagem em estufa. Primeiramente, um cadinho é pesado sem nenhum material em seu interior e depois pesa-se a massa da amostra a ser determinada a umidade. Em seguida, o cadinho com a amostra é colocado em uma estufa a 105°C pelo período de três horas. A umidade é calculada através da seguinte equação:

$$Umidade = \frac{((m_1 + m) - m_2)}{m} \times 100$$

Onde:

m_1 = Massa do cadinho de porcelana, em gramas;

m = Massa da amostra para o ensaio, em gramas;

m_2 = Massa do cadinho de porcelana + massa da amostra após secagem, em gramas.

Para a determinação de teor de umidade foi realizada apenas uma repetição de cada amostra.

4.2.3.5 Análises Laboratoriais

Para realização dos demais ensaios previstos foram segregados 10 gramas de cada uma das 72 amostras, respeitando-se a composição gravimétrica identificada durante as coletas de dados nas Associações de Catadores, e posteriormente passados duas vezes em moinho micro de facas modelo MA048 em tela de aço inox com 0,075 mm de abertura, resultando em amostras na forma de pó. A Figura 20 demonstra o moinho utilizado e a Figura 21 demonstra as amostras após serem processadas.

Figura 20 - Moinho MA048 utilizado no preparo das amostras.



Fonte: Figura da autora (2021).

Figura 21 - Amostras após processamento no moinho MA048.



Fonte: Figura da autora (2021).

Para a determinação dos metais (cádmio, cobre, cromo e zinco) no espectrômetro de absorção atômica e determinação dos cloretos no dionex foi realizada a solubilização das amostras. O processo ocorreu utilizando-se 100 mg de cada amostra e seguiu as seguintes etapas:

1. Adição de 10 mL de H_2SO_4 em um béquer de 250 mL juntamente com a amostra;
2. 20 minutos em uma chapa agitadora com aquecimento;
3. Adição de 2 mL de NaOH e 10 mL de água destilada para neutralização da amostra;
4. Transferência do conteúdo do béquer para um funil com filtro em um balão volumétrico;
5. Avolumar o conteúdo até 50 mL e agitar a amostra para homogeneização.

Para a determinação do mercúrio primeiramente foram compostas 8 amostras de cada Associação estudada, tendo em vista a disponibilidade de tempo do laboratório responsável por efetuar as leituras de mercúrio. As amostras foram compostas levando-se em consideração a quantidade de embalagens de macarrão e afins presentes nas amostras, uma vez que esta categoria representa a maior composição nas amostras. Em um béquer, 1 g de cada uma das três amostras escolhidas foi misturado para garantir a homogeneidade das mesmas, assim as amostras foram compostas conforme explicitado no Quadro 7.

Quadro 7 - Composição das amostras para determinação de mercúrio.

Amostra	Sul Recicla	Renacer	ACMR
1	1, 9, 10	1, 18, 23	1, 4, 19
2	2, 12, 24	2, 9, 10	2, 3, 15
3	3, 4, 8	3, 11, 14	5, 8, 17
4	5, 7, 17	4, 12, 20	6, 12, 13
5	6, 20, 23	5, 7, 22	7, 20, 22
6	13, 18, 19	6, 8, 13	9, 18, 23
7	11, 16, 22	15, 16, 17	10, 11, 16
8	14, 15, 21	19, 21, 24	14, 21, 24

Antes da realização dos testes de mercúrio no espectrômetro de fluorescência atômica foi realizada a solubilização das amostras seguindo procedimento adaptado de Collasiol (2004). Foram utilizadas 200 mg das amostras compostas para o seguinte procedimento de digestão ácida:

1. Transferência de 200 mg de amostra para um tubo do tipo Falcon de 50 mL;
2. Adição de 5 mL de HNO₃ 30% aos tubos e deixados em repouso por 30 minutos;
3. Adição de 5 mL de água destilada;
4. 5 minutos em um equipamento de ultrassom com frequência de 50 W de frequência de 55 Hz;
5. Centrifugação a uma rotação de 3500 rpm por 3 minutos;
6. Diluição da amostra em 10 vezes;
7. Estabilização da mesma com permanganato de potássio (KMnO₄) e cloridrato de hidroxilamina (NH₂OH).

O Quadro 8 apresenta as análises laboratoriais realizadas e os respectivos equipamentos para determinação.

Quadro 8 - Variáveis químicas analisadas, métodos e equipamentos.

Variável	Equipamento
Cloro	Dionex ICS 5000
Cádmio	Espectrômetro de absorção atômica VARIAN Spectra 250
Cromo	Espectrômetro de absorção atômica VARIAN Spectra 250
Cobre	Espectrômetro de absorção atômica VARIAN Spectra 250
Zinco	Espectrômetro de absorção atômica VARIAN Spectra 250
Mercúrio	Espectrômetro de fluorescência atômico Mercur Duo

4.2.3.6 Comparação dos resultados

Após a obtenção de todas as características químicas dos materiais, os resultados foram comparados com a legislação brasileira (Resolução SIMA 47/2020 e NBR 16.849/2020) para

verificar se os requisitos de qualidade são atingidos pelos rejeitos das associações de catadores do município de Florianópolis para utilização como CDR em fornos de cimenteiras.

4.2.4 Comparação das emissões atmosféricas geradas pelo rejeito e pelo coque de petróleo, considerando cada um como combustível de alto forno de cimento.

Para o cumprimento deste objetivo foram calculadas as emissões teóricas dos poluentes atmosféricos a partir dos fatores de emissão para CO₂, CH₄ e N₂O constantes na Ferramenta GHG Protocol versão 2020.1.2 a partir da utilização de CDR em fornos de cimenteiras considerando três cenários, sendo o cenário 1 para utilização de 15% de CDR e 85% de coque de petróleo, o cenário 2 para a utilização de 35% de CDR e 65% de coque de petróleo e o cenário 3 para a utilização de 55% de CDR e 45% de coque de petróleo.

Posteriormente as emissões teóricas calculadas foram comparadas entre os cenários, considerando os fatores de emissão do coque de petróleo e do CDR, verificando se as mesmas apresentam diferença significativa em detrimento do combustível empregado.

4.3 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Para a determinação do valor do CDR considerou-se o custo equivalente anualizado de investimento dos seguintes itens: unidade de tratamento mecânico, ponte rolante, estação de transbordo, balança rodoviária digital com plataforma de 9 x 3 metros, lote para implantação, obras de infraestrutura, compensação ambiental, área de apoio administrativo, barracão, estoque permanente de peças de reposição importadas e barracão de transbordo.

O custo equivalente anualizado foi calculado através da equação 1 (SOUZA et al., 2004).

$$CEA = CI * FRC + \frac{CI * OM}{100} (1)$$

Onde:

CEA: Custo equivalente anualizado;

CI: Custo de investimento, em R\$;

FRC: Fator de recuperação de capital;

OM: Taxa de operação e manutenção, em %.

Para a determinação do fator de recuperação de capital utilizou-se a equação 2.

$$FRC = \frac{d}{1-(1+d)^{-n}} \quad (2)$$

Onde:

d: Taxa de desconto ou taxa de atratividade (valor adotado igual a 0,123) (%/100)

n: Tempo em anos de vida do projeto.

O custo do CDR é definido pela soma do custo equivalente anualizado de cada item, dividido pela produção anual de CDR, conforme equação 3.

$$Custo\ CDR = \frac{\sum CEA}{PACDR}$$

Onde:

CEA: Custos equivalente anualizados, em R\$/ano

PACDR: Produção anual de CDR

4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS AMOSTRAS

O tratamento estatístico dos resultados obtidos no decorrer do estudo foi realizado através do software Statistica versão 8.0.

As estatísticas descritivas foram analisadas para a composição gravimétrica dos rejeitos da coleta seletiva e para a composição gravimétrica do CDR, objetivando um maior detalhamento dos dados obtidos. Foram calculados: média, mediana, moda, frequência da moda, valor mínimo, valor máximo, quartil inferior, quartil superior, amplitude, variância, desvio padrão, erro padrão, assimetria, erro padrão da assimetria, curtose e erro padrão da curtose através da análise “*Basic Statistics/Table*” do referido software.

Com o intuito de verificar se as amostras poderiam ser analisadas em conjunto, ou seja, se haveria homogeneidade das variâncias foi realizado o teste de Cochran e Bartlett a um nível de significância de 95%. Para que haja homogeneidade das variâncias é necessário que o valor de C calculado pelo teste seja inferior ao valor de C tabelado, considerando um grau de liberdade igual a 4 e as 72 amostras. Para confirmar os dados obtidos pelo teste de Cochran e Bartlett, realizou-se um teste ANOVA de uma via para um nível de significância igual a 95%.

Para verificar a normalidade dos dados de composição gravimétrica aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para cada categoria analisada em cada Associação. A determinação da normalidade definiu se os dados poderiam ser utilizados diretamente ou se seriam necessários tratamentos para a comparação entre a composição gravimétrica e as demais análises realizadas. Optou-se por tal teste tendo em vista que as variáveis são do tipo quantitativas e em número

inferior a 50. A distribuição dos dados foi considerada normal para um valor de p maior do que 0,05.

Com relação as análises de poder calorífico, cinzas, umidade, cloro e metais foram realizadas as médias, desvio padrão e variância. Para verificar quais categorias tem maior influência nas medidas foi realizada a correlação não-paramétrica de Spearman para um grau de confiabilidade de 95%. Resultados positivos de correlação indicam que uma das variáveis é função linear crescente da outra, enquanto resultados negativos indicam que a função é decrescente. Quanto mais próximos de 1 e -1 forem os valores, mais forte será a correlação entre as variáveis.

5. RESULTADOS

5.1 ROTEIROS DE COLETA X ASSOCIAÇÕES

Como já explicitado no item 4.1.1, o município de Florianópolis possui 52 roteiros de coleta para cobertura de todo o município com a coleta seletiva.

Durante o período de estudo foi possível observar que para a Associação ACMR, dos 52 possíveis roteiros, 35 foram enviados pelo menos uma vez para esta Associação, representando 67,31% dos resíduos de todo o município de Florianópolis. De todos os roteiros enviados para a Associação, 15 foram da região central do município, incluindo os roteiros noturnos, principalmente por esta Associação estar localizada junto ao Centro de Valorização de Resíduos, no bairro Itacorubi. Para a Sul Recicla, 21 roteiros foram enviados para a Associação durante o período de estudo, sendo 13 provenientes da região sul da ilha, 4 da região central, 3 da região continental e 1 da região norte do município, indicando que a maioria dos resíduos encaminhados para a Associação são provenientes da mesma região na qual se localiza, minimizando as rotas entre a geração dos resíduos e a sua destinação. A Associação Renascer recebeu resíduos provenientes de 20 roteiros de coleta, a com menor representatividade de todo o estudo, principalmente por ser uma Associação com menor capacidade de triagem, vinculado ao número de associados. Dentre os roteiros enviados, 11 são provenientes da região norte da ilha, 3 da região considerada central da cidade, 2 da região leste da ilha e outros 3 da região sul e 1 da região central. Os três roteiros da região sul: RS02 – Carianos (Loteamento Santos Dumont), RS09 – Rio Tavares e Lagoinha Pequena, RS11 – Rua do Gramal, Jardim dos Eucaliptos, Auroreal e Areias guardam certa proximidade com a Associação Sul Recicla, porém foram encaminhados para a Renascer, localizada no norte da ilha possivelmente pela grande quantidade de resíduos encaminhados diariamente para a Sul Recicla.

Analisando todas as Associações em conjunto, observa-se que 44 dos 52 roteiros de coletas existentes no município de Florianópolis foram destinados pelo menos uma vez durante a coleta de dados do estudo, ou seja, 84,61% dos resíduos recicláveis gerados no município de Florianópolis foram analisados no decorrer das 24 semanas de coleta de amostras nas Associações ACMR, Sul Recicla e Renascer. Importante ressaltar que os roteiros analisados possuem representantes de todas as regiões da cidade, fazendo com que os resíduos das regiões continente, centro, sul, leste e norte fossem analisados.

5.2 GRANULOMETRIA DOS REJEITOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de estudo preliminar da distribuição granulométrica da fração de rejeitos triados nas Associações componentes do presente estudo. Pode-se observar que para as três Associações grande parte da granulometria das amostras é superior ao requerido para utilização direta como CDR em fornos de produção de clínquer, de no máximo 50 mm. Para a Associação Renascer, cerca de 58% da amostra apresenta granulometria entre 100 e 200 mm, enquanto para a Associação ACMR 50% da amostra apresenta granulometria entre 150 e 250 mm e para a Associação Sul Recicla cerca de 69% da amostra apresenta granulometria entre 200 e 300 mm.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos da coleta seletiva das Associações participantes do estudo.

Granulometria (mm)	Renascer		ACMR		Sul Recicla		Todas as três	
	Peso (g)	Percentual (%)	Peso (g)	Percentual (%)	Peso (g)	Percentual (%)	Peso (g)	Percentual (%)
50	30	4,41%	10	6,97%	50	1,28%	10	1,28%
100	90	13,24%	60	26,06%	190	7,69%	40	5,13%
150	80	11,76%	110	33,55%	250	14,10%	60	7,69%
200	230	33,82%	130	86,39%	640	16,67%	280	35,90%
250	60	8,82%	150	49,84%	380	19,23%	170	21,79%
300	40	5,88%	140	35,37%	270	17,95%	90	11,54%
350	0	0,00%	80	16,67%	130	10,26%	50	6,41%
400	40	5,88%	40	21,27%	160	5,13%	80	10,26%
450	0	0,00%	40	5,13%	40	5,13%	0	0,00%
500	110	16,18%	20	18,74%	130	2,56%	0	0,00%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

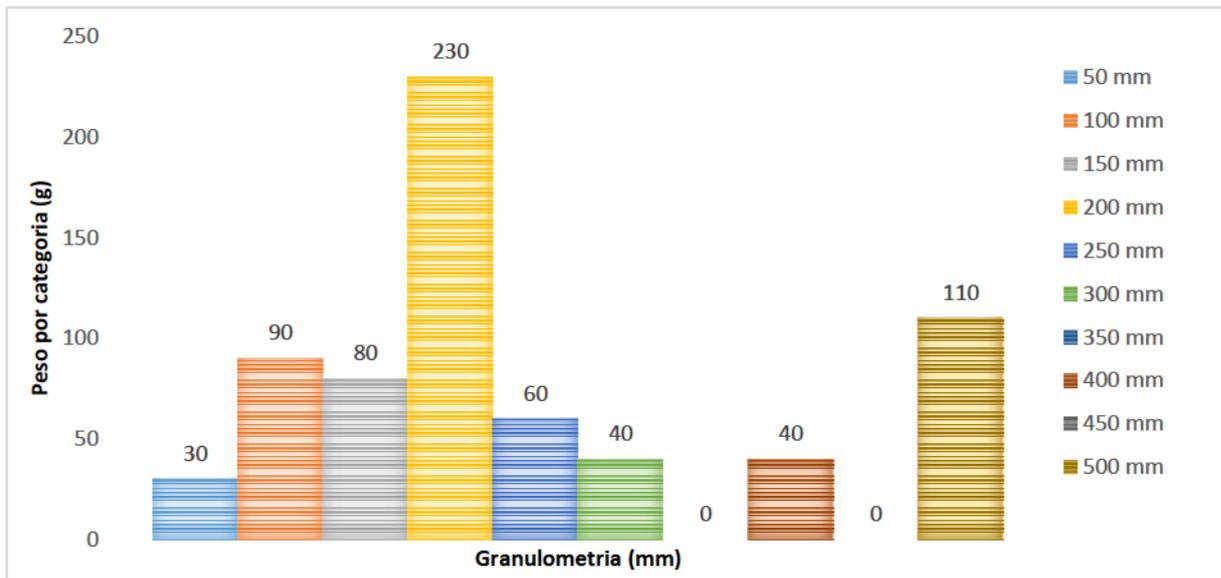
Ao realizar-se uma análise conjunta para as três associações objeto do estudo, verifica-se que as frações representativas da distribuição granulométrica são, na sequência, a de 200 mm, 250 mm e 300 mm, equivalendo as três frações a aproximadamente 58% da totalidade dos rejeitos. Ao adicionar-se as frações limítrofes de 150 mm e 350mm, a quantidade total dos rejeitos é de aproximadamente 75%, portanto, compreendidas neste intervalo, indicando possibilidades de integração de equipamentos para redução de granulometria neste intervalo de fração dos rejeitos da coleta seletiva.

A granulometria média para a Associação Renascer foi de 244,86 mm com um desvio padrão de 56,57 e uma variância igual a 3200,61, enquanto para a Associação ACMR a granulometria média foi de 257,06 mm, com desvio padrão equivalente a 52,11 e uma variância igual a 2715,10 e para a Associação Sul Recicla a granulometria média obtida foi de 241,68

mm, desvio padrão igual a 70,39 e variância 4955,11. Com relação aos dados das Associações somados obteve-se a granulometria média de 247,87 mm, desvio padrão de 163,93 e variância de 26872,40. Os dados expostos demonstram a grande variabilidade e dispersão das granulometrias dos rejeitos, indicando a necessidade de um preparo prévio à utilização dos mesmos como CDR.

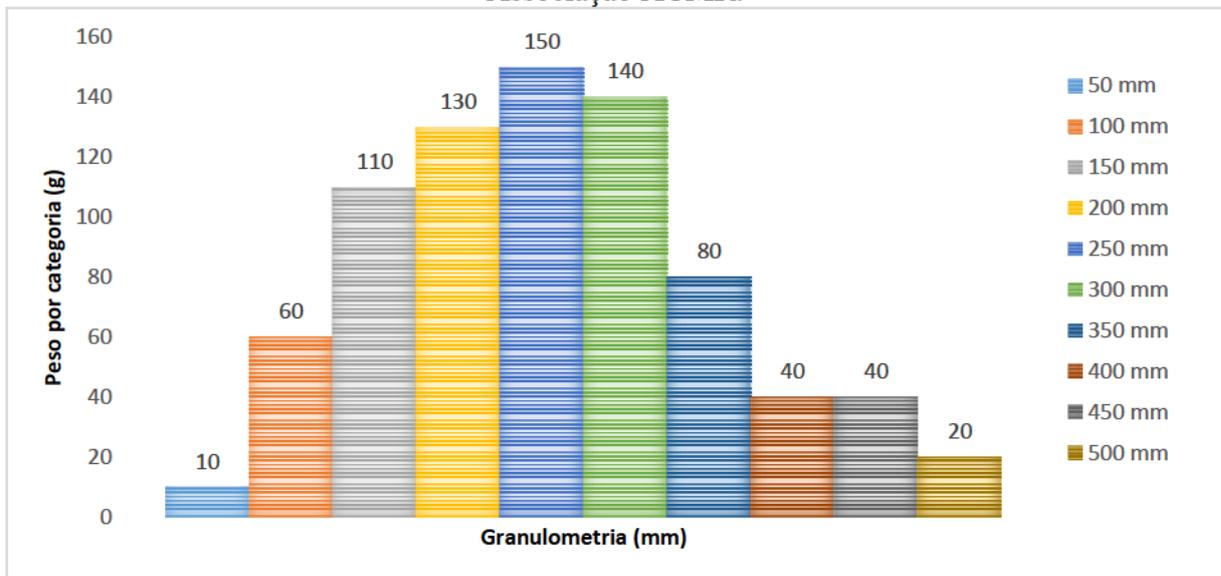
Os gráficos a seguir apresentam a distribuição granulométrica das amostras analisadas nas três Associações e em todas as Associações em conjunto (Gráfico 1 a Gráfico 4).

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos da coleta seletiva realizada pela Associação RENASCER.



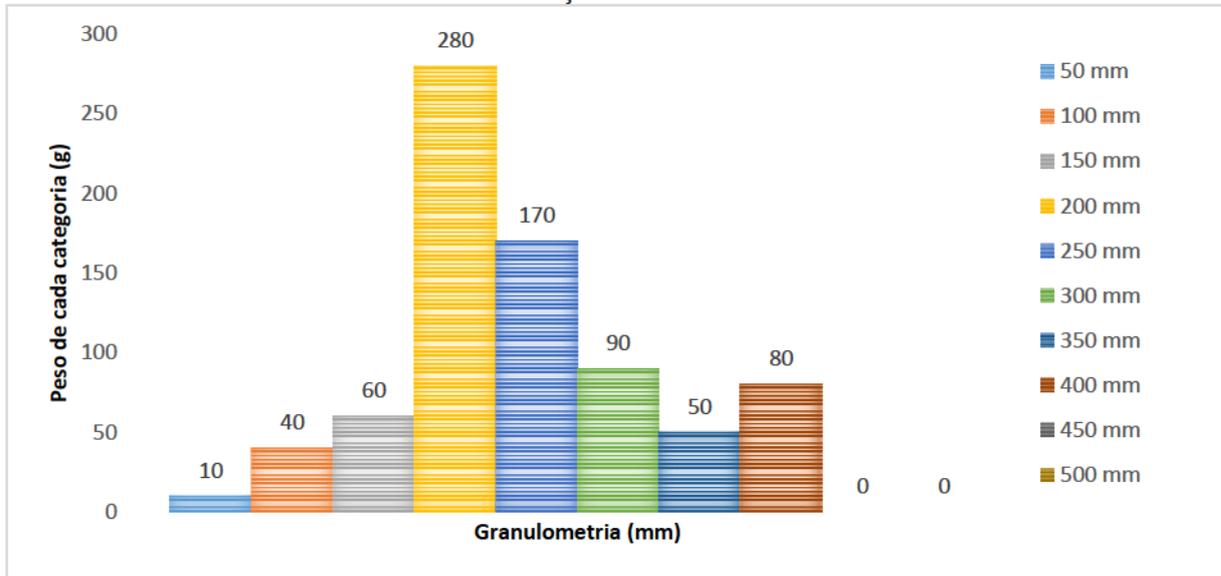
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica dos rejeitos da coleta seletiva realizada pela Associação ACMR.



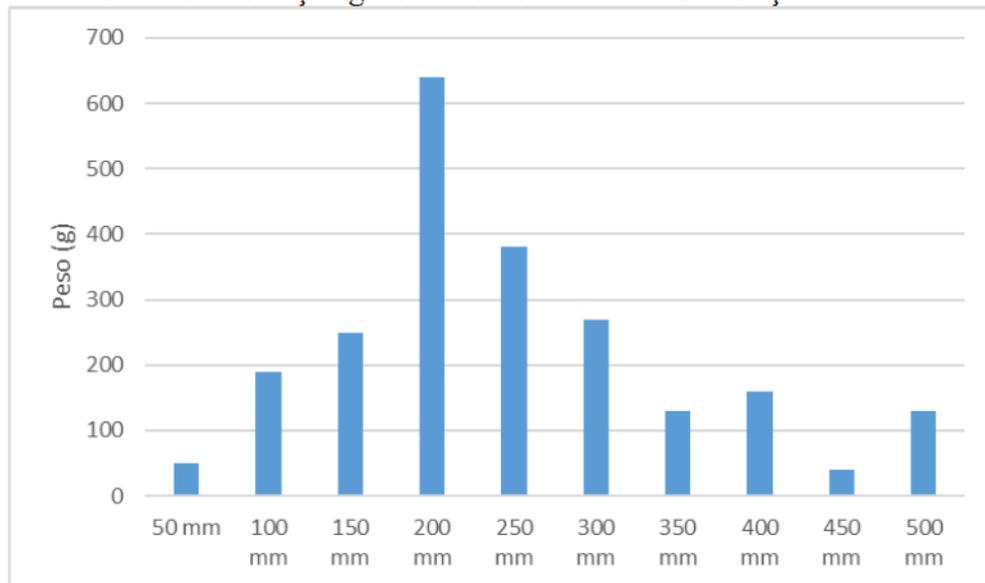
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica dos rejeitos da coleta seletiva realizada pela Associação Sul Recicla.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 4 - Distribuição granulométrica total das Associações analisadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A granulometria dos resíduos para produção de CDR representa um desafio, tendo em vista a sua natureza heterogênea e a ampla distribuição de tamanho de partícula (RANIERI et al., 2017). A distribuição granulométrica é responsável por definir os processos aos quais um CDR vai estar sujeito, dentre eles: projeto de forno, temperatura de controle, tempo de residência, taxa de aquecimento, formação de subprodutos, entre outros (RANIEIRI et al., 2017).

A redução do tamanho das partículas em uma escala real é, geralmente, uma operação de várias etapas, que envolve diferentes técnicas, cuja variação depende das características

físicas das amostras e do tamanho de partícula final necessário bidimensional (GARCÉS et al., 2016).

Em estudo desenvolvido por Ranieiri et al. (2017) os rejeitos analisados de uma planta de tratamento mecânico biológico que seriam encaminhados para produção de CDR apresentaram distribuição granulométrica entre 200 mm e 200 μm , sendo que a maior quantidade (31,60 %) dos rejeitos apresentava granulometria igual a 3,15 mm, seguido da granulometria igual a 400 μm (19,52%) e igual a 200 μm (14,09%). No estudo de Bessi et al. (2016) a distribuição granulométrica das amostras apresentou-se homogênea, tendo em vista o controle na etapa de refino da produção de CDR, com mais de 80% dos materiais apresentando granulometria entre 50 e 100 mm.

Com a publicação da ABNT NBR 16849/2020 que visa a utilização de resíduos sólidos urbanos para a recuperação energética, a determinação do tamanho das partículas é especificação obrigatória para determinar as características dos lotes de RSU para fins energéticos, juntamente com os códigos de classe, indicação do número de amostras, origem do resíduo, tipo de preparação, formato predominante das partículas, teor de cinzas e teor de umidade.

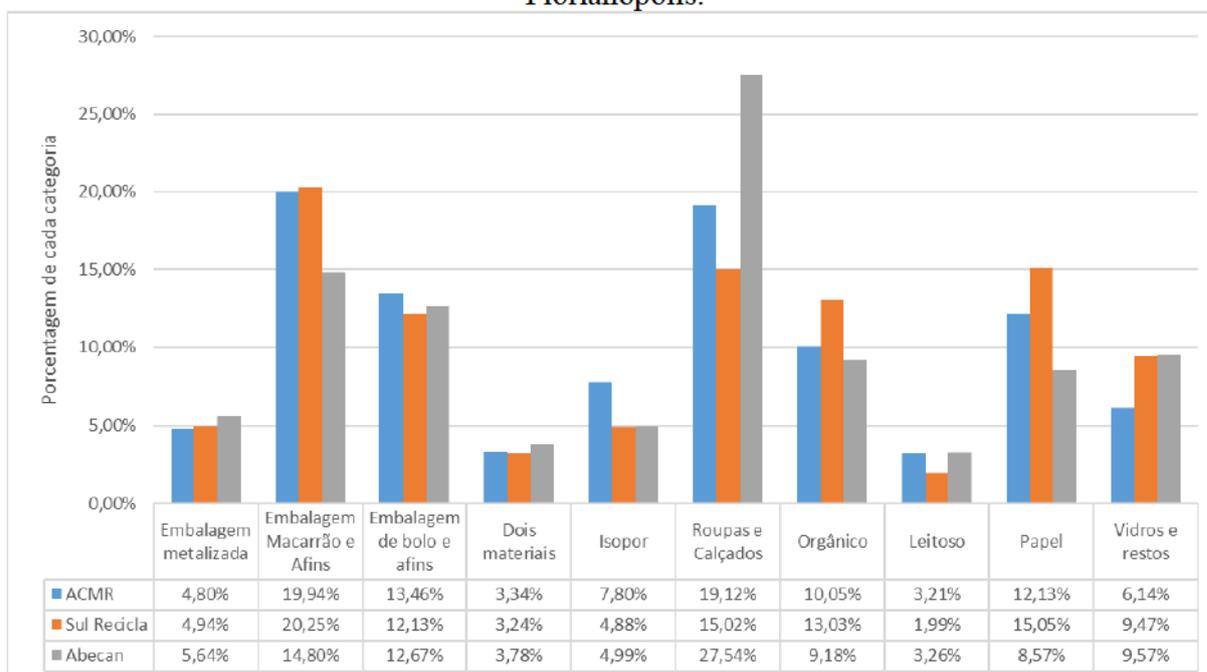
5.3 QUANTIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES

Conforme já exposto anteriormente, foram realizadas coletas de 72 amostras em 3 Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis objetivando, entre outros aspectos, analisar a composição gravimétrica dos rejeitos destas Associações e do município como um todo.

As dez categorias estabelecidas para a presente pesquisa, conforme já exposto na metodologia, foram definidas com base no conhecimento empírico da autora e em trocas de saberes com os catadores das Associações analisadas.

Entre a Tabela 21 e a Tabela 23, apresentadas no Apêndice A, são exibidos os dados de composição gravimétrica das amostras coletadas considerando as dez categorias estabelecidas para este estudo. O Gráfico 5 apresenta a síntese dos resultados da composição gravimétrica identificada das Associações e detalhada no Apêndice A.

Gráfico 5 - Síntese da composição gravimétrica dos rejeitos coletados nas Associações de Florianópolis.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

No decorrer de toda a amostragem observou-se quantidade muito variável das categorias orgânicos, roupas e calçados e vidros e restos, motivadas principalmente pela forma de trabalho de cada Associação. Como as Associações Sul Recicla e Renascer são menores, a separação dos vidros se dá de maneira mais eficaz e, desta forma, poucos são os vidros descartados como rejeitos, resultando em grande variabilidade destes resultados.

Analisando os dados das tabelas supramencionadas, observa-se que em alguns casos as categorias vidros e roupas e calçados representam grande porcentagem das amostras. No item 5.4 detalha-se apenas os rejeitos utilizados para a produção do CDR proposto e observa-se maior uniformidade da composição gravimétrica entre as amostras e entre as Associações.

Para maior entendimento acerca dos dados de composição gravimétrica foram efetuadas as estatísticas descritivas dos dados coletados em cada Associação, os quais são apresentados no Apêndice B.

Conforme pode ser verificado na Tabela 24, Apêndice B, as dez categorias analisadas na Associação Sul Recicla apresentaram uma grande amplitude, principalmente nas categorias roupas e calçados, orgânico, papel e vidros e restos, ocasionada principalmente por, em algumas amostras, não serem identificadas as respectivas categorias. Observa-se também que para 6 das 10 categorias a moda é múltipla, ou seja, há mais de um valor frequente no conjunto de dados analisados. Com relação ao desvio padrão da composição gravimétrica observa-se que as categorias leitoso e dois materiais apresentam o menor desvio, com valores próximos de 1, as

categorias embalagem metalizada e isopor apresentam desvio padrão próximo de 2,5, as categorias embalagem de macarrão e afins e embalagem de bolo apresentam desvio padrão da ordem de 6, indicando a grande amplitude de valores das categorias, por fim, as categorias roupas e calçados, orgânicos, papel e vidros e restos apresentam desvio padrão acima de 11 também ocasionado pela grande amplitude de valores identificados no decorrer da amostragem.

Na Tabela 25, Apêndice B, são apresentadas as estatísticas descritivas referente aos dados coletados na Associação ACMR e observa-se que 8 das 10 categorias apresentaram moda múltipla, indicando a presença de mais de um valor frequentemente observado no conjunto de dados. Observa-se um grande coeficiente de variação principalmente nas categorias vidros e restos e orgânico, ocasionado pela ausência destas categorias no decorrer da coleta de algumas amostras. O erro padrão calculado para um nível de significância de 95% variou entre 0,35 e 1,83 nas categorias embalagem metalizada, embalagem de macarrão e afins, embalagem de bolo, dois materiais, isopor, roupas e calçados, leitoso e papel, enquanto na categoria orgânico foi igual a 3,16 e na categoria vidros e restos foi 2,93, confirmando a grande amplitude dos resultados obtidos.

Para a Associação Renascer, a Tabela 26, Apêndice B, demonstra que, semelhante à Associação ACMR, 8 das 10 categorias apresentaram moda múltipla, sendo que nas categorias orgânico e vidros e restos a moda foi zero tendo em vista que não foram identificadas estas categorias em várias amostras. As categorias embalagem metalizada, dois materiais, isopor e leitoso apresentaram desvio padrão da ordem de 2, enquanto as categorias embalagem de macarrão e afins, embalagem de bolo e papel apresentaram desvio padrão da ordem de 5. As categorias vidros e restos, roupas e calçados e orgânico apresentaram, respectivamente, desvio padrão igual a 15,51, 14,13 e 11,21 confirmando a grande variabilidade e amplitude das composições destas categorias, tal qual já identificado nas demais Associações.

Muitos são os fatores que influenciam na geração de resíduos recicláveis e sua respectiva composição gravimétrica, tais como fatores físicos, geográficos, socioculturais e políticos (GALLARDO et al., 2017). Desta forma, os sistemas de coleta seletiva são responsáveis por proporcionar níveis satisfatórios de recuperação dos RSU, sendo que os sistemas implementados podem ser organizados de diferentes formas em cada país, ou no mesmo país, como é o caso do Brasil (GALLARDO et al., 2017).

Com relação aos quantitativos de resíduos recicláveis e rejeitos de cada Associação, de acordo com dados da Divisão de Coleta Seletiva da COMCAP entre os anos de 2017 e 2020 a média de rejeitos em todas as Associações foi de 20,45%, indicando que todos os anos, cerca de 2.265.000 kg de rejeitos são encaminhados para o aterro sanitário, desperdiçando recursos

que poderiam ser reintegrados através da recuperação energética. A Tabela 2 demonstra os dados da Divisão de Coleta Seletiva da COMCAP entre os anos de 2017 e 2020.

Tabela 2 - Evolução dos quantitativos de resíduos recicláveis e rejeitos em Florianópolis entre 2017 e 2020.

Ano	Resíduos		% de Rejeitos
	Recicláveis (kg)	Rejeitos (kg)	
2017	9.840.650	2.029.016	20,62%
2018	10.340.826	2.169.382	20,98%
2019	12.775.690	2.515.430	19,69%
2020	11.436.700	2.346.584	20,52%

Fonte: DVCOS/COMCAP.

Sabendo-se da composição gravimétrica dos rejeitos das Associações é possível estimar a quantidade de material disponível para a produção de CDR, excluindo-se deste cálculo as porcentagens das categorias roupas e calçados, orgânicos e vidros e restos, por prejudicarem a qualidade do combustível final. Considerando a média da composição gravimétrica das três Associações analisados e assumindo que estas são representativas dos rejeitos de toda a cidade, conforme já evidenciado no item 5.1, tem-se que 60,29% dos rejeitos provenientes das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis poderiam ser encaminhados para a produção de CDR, garantindo um fornecimento mensal médio de 117.896 kg de rejeitos.

5.4 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS REJEITOS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE CDR

O quantitativo de resíduos recicláveis em Florianópolis foi influenciado diretamente pela pandemia de COVID19, porém a composição dos rejeitos manteve-se constante, conforme evidenciado nas tabelas do Apêndice C (Tabela 27 a Tabela 29).

Para verificar a homogeneidade das variâncias a um nível de significância de 95% foi realizado o teste de Cochran e Bartlett (Tabela 3). Para o teste de Cochran se o valor de C calculado for maior do que o C tabelado, então não há homogeneidade das variâncias. No presente estudo, considerando as 72 amostras e um grau de liberdade igual a 4, o valor de C tabelado é igual a 0,3516. Desta forma, comparando os dados obtidos na Tabela 3 com o valor tabelado de C, nenhuma das categorias apresenta variâncias homogêneas, ou seja, os dados das três Associações não podem ser analisados em conjunto por apresentar grande variabilidade em suas composições.

Tabela 3 - Resultados do teste de homogeneidade das variâncias para cada categoria.

	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	P
Embalagem Metalizada	2,07	0,41	3,36	0,19
Embalagem Macarrão e Afins	1,26	0,37	0,30	0,86
Embalagem de Bolo e Afins	1,77	0,41	1,89	0,39
Dois Materiais	3,75	0,59	10,22	0,01
Isopor	1,27	0,37	0,32	0,85
Leitoso	2,43	0,52	5,15	0,08
Papel	2,11	0,46	3,10	0,21

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Também realizou-se um teste ANOVA de uma via para um nível de significância igual a 95%. Foi possível constatar que os dados apresentam diferenças significativas entre si, traduzidas nos resultados de p valor resultantes dos testes, onde um valor de $p < 0,0001$ significa que a hipótese nula pode ser rejeitada, ou seja, há diferença significativa entre as variâncias do conjunto de dados (Tabela 4).

Tabela 4 - P valor da ANOVA de uma via.

Associação	Embalagem Metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo e Afins	Dois Materiais	Isopor	Leitoso	Papel
P valor	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com os resultados expressos na Tabela 4 pode-se concluir que há diferenças significativas entre as Associações analisadas, ou seja, não é possível avaliar as composições de cada amostra coletada em conjunto, sendo necessária uma análise por Associação, conforme já identificado no teste de Cochran. Este resultado corrobora com o estudo de Piaia (2017) que menciona que a triagem realizada em Associações de Catadores é influenciada por diversos fatores, dentre os quais: os materiais que são comercializados, a cultura de determinada Associação, o conhecimento e experiência dos catadores acerca de cada tipo de material.

Sabendo-se da variabilidade dos dados, foram analisadas as seguintes variáveis para cada Associação: média, erro padrão da média, mediana, moda, frequência da moda, desvio padrão, variância, erro padrão, assimetria, erro padrão da assimetria, curtose, erro padrão da curtose, valores mínimos e máximos, quartil superior, quartil inferior, range e intervalo interquartil. Os dados obtidos para as sete categorias utilizadas para o CDR proposto são apresentados no Apêndice D.

Analisando-se a Tabela 30, Apêndice D, cujos dados apresentados referem-se à ACMR, observa-se que a categoria que mais contribuiu para a composição do CDR foi a embalagem de macarrão e afins, o que pode ser explicado pela grande variedade de embalagens enquadradas nesta categoria. Em seguida estão a embalagem de bolo e o papel, com

porcentagens superiores a 15% para ambas as categorias. Com relação ao desvio padrão das categorias observa-se que embalagem metalizada, dois materiais e leitoso apresentam valores próximos de 2, indicando que os valores estão próximos entre si. A categoria papel foi a que apresentou desvio padrão, e conseqüentemente a variância, com maior valor, demonstrando a grande variabilidade de composições, sendo 4,54% a contribuição mínima identificada e 41,94% a máxima, representando uma amplitude de 37,40. As categorias embalagem de macarrão e afins e embalagem de bolo também apresentaram desvio padrão relativamente considerável, sendo que a categoria embalagem de macarrão e afins apresentou uma amplitude de 22,78 entre os valores máximo e mínimo e a categoria embalagem de bolo uma amplitude de 21,96. Com relação ao intervalo entre o quartil inferior e o quartil superior, ou seja, o intervalo onde estão localizados 50% dos dados analisados, observa-se os mesmos resultados expostos anteriormente, as categorias papel, embalagem de macarrão e afins e embalagens de bolo representam os maiores intervalos. Em se tratando de assimetria, valores negativos indicam uma distribuição de dados para a direita e valores positivos indicam uma distribuição para a esquerda. Sendo assim, as categorias embalagem metalizada e dois materiais apresentariam deslocamento para a direita, entretanto considerando o erro da assimetria, não se pode afirmar este deslocamento dos dados obtidos. As demais categorias apresentam deslocamento para a esquerda, com exceção do isopor cuja afirmativa de deslocamento não pode ser feita tendo em vista o erro da assimetria. A curtose indica o quão deslocada para cima (valor positivo) ou para baixo (valor negativo) está a distribuição dos dados observados. As categorias embalagem metalizada, embalagem de macarrão e afins, dois materiais, isopor e leitoso possuem valores negativos de curtose, indicando que a distribuição dos dados está abaixo da distribuição normal.

Com relação à Sul Recicla, os dados da Tabela 31, Apêndice D, demonstram que, semelhante à ACMR, a categoria que mais contribuiu para a composição do CDR foi embalagem de macarrão e afins, com 32,95% em média, seguida de papel, com 23,24% e embalagem de bolo, com 19,07%. Com relação ao desvio padrão dos valores observa-se que a Sul Recicla apresenta valores próximos aos identificados na ACMR, com a categoria papel apresentando o maior desvio padrão. A categoria papel apresentou a maior amplitude, seguida de isopor, embalagem de bolo e embalagem de macarrão e afins. O intervalo interquartil, que representa 50% dos dados de cada categoria, foi de 22,05 para a categoria papel, 12,61 para a categoria embalagem de bolo, 9,41 para a categoria embalagem de macarrão e afins e abaixo de 6 para as demais categorias. Com relação a assimetria, as categorias embalagem de bolo, dois materiais e papel não apresentam deslocamento dos dados, tendo em vista seus valores

próximos de zero. As categorias isopor e leitoso apresentam valores positivos, indicando o deslocamento dos dados para a esquerda. A curtose da categoria isopor e da categoria leitoso apresentaram valores iguais a 6,92 e 1,26, respectivamente, indicando que a distribuição dos dados está muito acima da distribuição normal. As demais categorias apresentaram valores negativos, apontando que os dados estão deslocados para baixo.

Seguindo a tendência das outras duas Associações, na Renascer, conforme pode ser observado na Tabela 32, a categoria com maior contribuição para a composição do CDR foi a embalagem de macarrão e afins, com uma média de 27,39%. Em seguida estão: embalagem de bolo, papel e embalagem metalizada, com contribuição média de 23,16%, 16,32% e 10,56%, respectivamente. As demais categorias apresentaram porcentagens de contribuição abaixo de 10%. Também semelhante as demais Associações, a categoria papel apresentou a maior amplitude, com a diferença que nesta Associação em uma amostra a porcentagem foi nula, ou seja, não houve descarte de papel na ocasião. Os valores de desvio padrão, e consequentemente da variância, são, em geral, menores do que nas outras Associações, indicando a distribuição dos dados mais próxima dos valores médios. O intervalo interquartil apresentou valor de 12,62 para a categoria embalagem de macarrão e afins, sendo a maior amplitude das categorias analisadas para esta Associação, seguido de 10,50 para a categoria papel e 8,76 para a categoria embalagem de bolo. As demais categorias apresentaram um intervalo interquartil igual ou menor do que 6. Com relação à assimetria, as categorias embalagem metalizada, embalagem de macarrão e afins, embalagem de bolo e isopor não apresentam deslocamento da série de dados considerando o erro da assimetria. As demais categorias apresentam deslocamento dos dados para a esquerda. Em se tratando da curtose, as categorias embalagem metalizada, embalagem de macarrão e afins, embalagem de bolo, isopor e leitoso não apresentam deslocamento dos dados considerando o erro da curtose. As categorias dois materiais e papel apresentam deslocamento dos dados acima da distribuição normal.

Com a análise da composição de cada categoria para cada Associação observa-se que não há um padrão de geração, apresentando valores com grandes amplitudes e intervalos interquartil, indicando que a qualidade da triagem e dos materiais que chegam até as Associações por meio da coleta seletiva influenciam diretamente nos rejeitos que serão gerados e, consequentemente, no combustível que seria produzido a partir destes materiais. É consenso entre todas as Associações que as porcentagens mais significativas de contribuição para a composição das amostras são compostas por embalagem de macarrão e afins, embalagem de bolo e papel, sendo que tais categorias, juntas, representam em média 70%.

Para verificar a normalidade dos dados aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para cada categoria analisada em cada Associação (Tabela 5). Optou-se pela realização de tal teste tendo em vista as variáveis quantitativas e o número de amostras (24), uma vez que o referido teste é indicado para variáveis quantitativas que apresentam número de valores menor que 50. Neste caso, a distribuição dos dados é considerada normal se o valor de p for maior do que 0,05.

Tabela 5 - P valor dos testes de Shapiro Wilk aplicados para cada categoria e cada Associação.

	ACMR	Sul Recicla	Renascer
Embalagem Metalizada	0,91	0,14	0,85
Embalagem Macarrão e Afins	0,20	0,47	0,45
Embalagem de Bolo e Afins	0,57	0,21	0,88
Dois Materiais	0,54	0,21	0,043
Isopor	0,48	0,0062	0,84
Leitoso	0,20	0,039	0,026
Papel	0,06	0,23	0,41

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Através dos dados da Tabela 5 observa-se que para a ACMR todas as categorias apresentam distribuição de dados normal. Para a Sul Recicla, as categorias isopor e leitoso não apresentaram distribuição normal, sendo necessário um tratamento dos dados antes da continuidade das estatísticas dos resultados obtidos. Para a Renascer, as categorias dois materiais e leitoso não apresentaram distribuição normal. Tanto os resultados da Sul Recicla quanto os dados da Renascer já eram esperados, tendo em vista que estas categoriais não apresentaram-se bem distribuídas no decorrer das coletas de dados.

Em ambas as Associações observa-se a presença de outliers, ou seja, valores que são muito diferentes dos demais. Em tratamentos estatísticos, normalmente os outliers são provenientes de erros de medidas ou de algum equívoco na obtenção dos dados, entretanto, no presente caso, os outliers fazem parte da grande variabilidade dos dados coletados, não podendo ser excluídos das análises.

5.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS REJEITOS COMO CDR

Para a determinação da viabilidade energética de um combustível, o principal fator a ser analisado é o poder calorífico. A determinação do poder calorífico possibilita uma visão da quantidade de energia que pode ser recuperada a partir dos RSU (KATHIRAVALE, 2003). A Tabela 6 apresenta dos dados de poder calorífico obtidos para as 72 amostras em duplicata, 24 de cada Associação analisada.

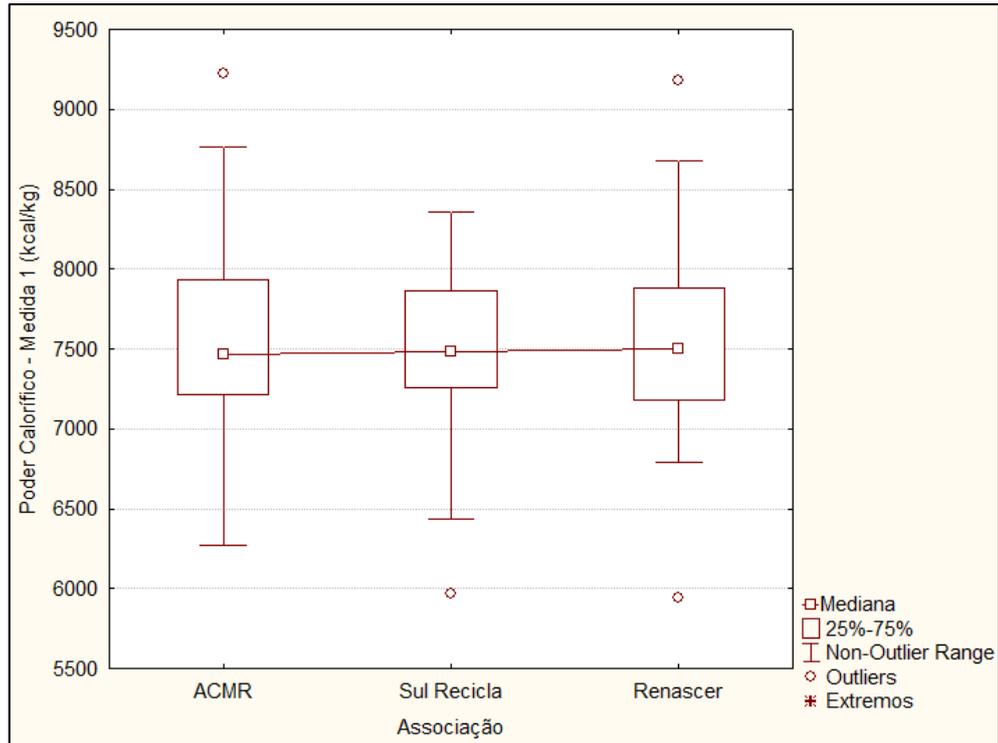
Tabela 6 – Poder calorífico identificado nas amostras.

Amostra	Sul Recicla		Renascer		ACMR	
	Medição 1 (kcal/kg)	Medição 2 (kcal/kg)	Medição 1 (kcal/kg)	Medição 2 (kcal/kg)	Medição 1 (kcal/kg)	Medição 2 (kcal/kg)
1	7853,45	7694,22	7864,99	7965,41	7228,08	7162,30
2	6437,90	6580,32	5946,49	5866,73	7981,79	8260,41
3	8127,94	8096,11	7806,32	7731,44	8764,29	8707,23
4	7958,22	7923,32	7267,69	7231,56	7541,80	7656,16
5	7359,72	7393,52	6806,32	6850,60	6988,83	6972,57
6	8163,42	8256,01	8678,05	8550,67	7273,33	7403,69
7	7319,86	7183,89	9183,06	8928,62	9223,31	9431,47
8	8189,33	8082,17	8482,58	8397,47	6712,56	6716,72
9	7495,76	7637,89	7356,05	7324,70	7867,92	7814,37
10	7568,10	7607,81	6798,32	6491,49	8431,47	8379,21
11	7195,85	7165,18	6791,40	6711,68	7358,52	7648,23
12	6583,98	6535,96	7088,72	7047,29	7873,58	8221,74
13	7455,27	7462,81	8224,95	8238,73	7011,05	6993,57
14	5971,30	6064,38	7405,66	7373,19	7886,72	7806,55
15	7182,91	7022,45	7900,00	7839,48	7396,31	7355,82
16	8359,23	8521,68	7438,22	7301,83	7246,54	7156,44
17	7544,90	7592,66	7486,25	7481,04	6274,96	6272,53
18	7879,99	7898,85	7296,05	7353,67	7197,84	7247,13
19	7410,13	7357,33	8655,60	8333,74	8453,16	8289,23
20	7468,60	7303,69	7048,72	7026,72	8384,44	8351,27
21	7697,33	7792,93	7511,68	7406,27	7270,45	7222,90
22	7357,80	7346,89	7524,84	7511,38	7673,33	7672,89
23	7061,53	6970,99	7570,02	7460,78	7071,50	7085,77
24	7809,05	7894,77	7512,00	7459,02	7614,41	7454,31
Média	7477,15	7474,41	7568,50	7495,15	7613,59	7636,77
Desvio padrão	569,90	570,95	729,72	704,60	686,90	710,24
Variância	322981,75	330521,55	509488,51	474992,94	464674,24	498223,63

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

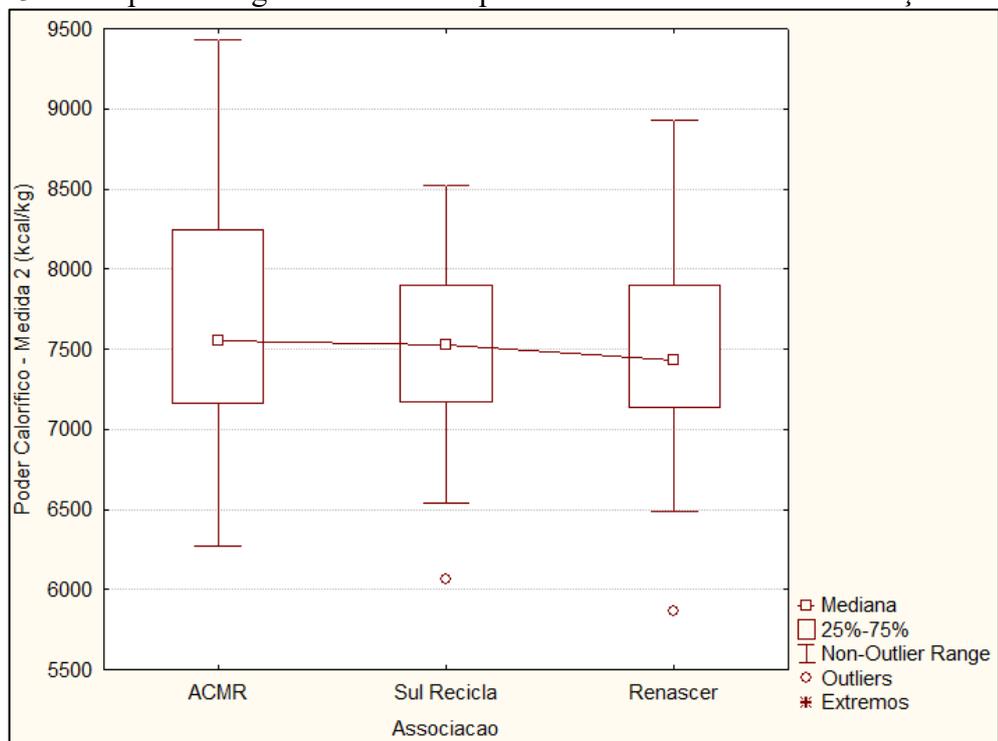
Conforme pode ser verificado na Tabela 6 o valor médio de poder calorífico para as três Associações analisadas foi de 7544,26 kcal/kg, sendo que na Sul Recicla o poder calorífico médio foi de 7475,78 kcal/kg, na Renascer foi de 7531,83 kcal/kg e na ACMR foi de 7625,18 kcal/kg. A variabilidade dos resultados entre as amostras e entre as Associações pode ser explicada pelas variações de composição gravimétrica das mesmas, sendo que quanto maior a porcentagem de plásticos em uma determinada amostra, maior o seu poder calorífico. A Figura 22 e a Figura 23 demonstram o box-plot dos resultados de poder calorífico, indicando que apesar de alguns valores fora da média e com presença de outliers, os resultados das três Associações são semelhantes em 50 % das amostras.

Figura 22 – Box plot da primeira medida de poder calorífico entre as Associações estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 23 – Box plot da segunda medida de poder calorífico entre as Associações estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Importante mencionar que os dados apresentados representam o poder calorífico superior das amostras analisadas. Para o poder calorífico inferior pode ser utilizada a equação:

$$PCI = PCS - w * h_{LV}$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior, em kcal/kg;

PCS = Poder calorífico superior, em kcal/kg;

h_{LV} = Entalpia de vaporização da água a 25°C, em kcal/kg

w = Teor de umidade das amostras.

A preparação prévia dos rejeitos utilizados para a composição do CDR testado e a composição gravimétrica composta majoritariamente por diversos tipos de plásticos, em média 75,16% da composição total, e papel, em média 19,14% da composição total, contribuíram, desta forma, para os resultados de poder calorífico identificados nas duplicatas das 72 amostras analisadas. Em estudo desenvolvido em uma planta para produção de CDR na Lituânia, Arina et al. (2020) identificaram que a composição do CDR é principalmente de plásticos, com cerca de 52,1%.

Para determinação da relação estatística entre cada categoria e os resultados de poder calorífico foi realizada a correlação não-paramétrica de Spearman para um grau de confiabilidade de 95%. Resultados positivos indicam que uma das variáveis é função linear crescente da outra, enquanto resultados negativos indicam que a função é decrescente. Quanto mais próximos de 1 e -1 forem os valores, mais forte será a correlação entre as variáveis. A Tabela 7 demonstra as correlações obtidas.

Tabela 7 – Correlações não-paramétricas de Spearman PCI x categorias.

Correlação	Sul Recicla		Renascer		ACMR	
	PCI Medida 1	PCI Medida 2	PCI Medida 1	PCI Medida 2	PCI Medida 1	PCI Medida 2
Embalagem Metalizada	0,61	0,58	0,47	0,45	0,12	0,11
Macarrão	0,38	0,38	0,22	0,25	0,62	0,62
Bolo	0,27	0,25	0,11	0,08	0,37	0,37
Dois	-0,11	-0,12	-0,37	-0,37	-0,04	-0,03
Isopor	0,55	0,53	0,14	0,17	0,26	0,25
Leitoso	0,34	0,36	0,28	0,25	0,13	0,12
Papel	-0,78	-0,77	-0,55	-0,54	-0,65	-0,65

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Através das correlações apresentadas na Tabela 7 observa-se que para todas as Associações as categorias dois materiais e papel apresentam valores negativos, indicando a função linear decrescente, ou seja, quanto menor a quantidade de um maior será o valor do outro. Também para todas as Associações observa-se que a categoria papel apresenta os maiores valores de correlação, indicando que quanto menor a quantidade de papel da amostra, maior será o seu poder calorífico. Para a Sul Recicla observa-se forte correlação do poder calorífico com as categorias embalagem metalizada, macarrão, isopor e leitoso, indicando que estas são

as categorias que mais influenciam no poder calorífico gerado nessas amostras. Para a Renascer, embalagem metalizada, leite, macarrão e isopor também foram as categorias que mais influenciaram no poder calorífico, entretanto em ordem de importância diferente do que na Sul Recicla, indicando variação no que diz respeito à composição das amostras. Por fim, para a ACMR as categorias macarrão, bolo e isopor foram as que mais contribuíram para o poder calorífico. Observa-se que as Associações Sul Recicla e Renascer apresentam as mesmas categorias influenciando no poder calorífico, enquanto na ACMR houve a adição da categoria embalagem de bolo, tal fato indica a grande variabilidade da composição das amostras entre as Associações.

No estudo desenvolvido por Gallardo et. al (2014) obteve-se um valor de poder calorífico de 4.920,23 kcal/kg, provenientes de rejeitos de uma planta de tratamento mecânico biológico na Espanha. Em estudo desenvolvido por Brás et. al (2017) em Portugal, dentre outros resultados, obteve-se um valor de 5.507,79 kcal/kg para rejeitos provenientes de coleta seletiva. Também com os rejeitos de uma planta de tratamento mecânico biológico, Shumal et. al (2020) realizou estudos sobre a utilização de rejeitos como fonte de produção de CDR e obteve um poder calorífico igual a 2.904,37 kcal/kg, sendo que o baixo valor, neste caso, está associado ao alto teor de cinzas e umidade das amostras analisadas. Conforme exposto, os valores mais próximos em estudos semelhantes com os resultados obtidos nesta pesquisa foram os apresentados por Brás et. al (2017), cujos rejeitos analisados também foram os provenientes da coleta seletiva, indicando esta fonte promissora de combustível alternativo também em outros países.

Conforme evidenciado através dos dados da Tabela 7, a recuperação de energia dos rejeitos que seriam outrora dispostos em aterros sanitários torna-se vantajosa. Tal afirmativa concorda com o mencionado por Usón et. al (2010), em que a recuperação da energia contida nos rejeitos traduz-se em uma forma sustentável de explorar os recursos contidos nos resíduos que, de outra forma, seriam desperdiçados em aterros, levando à poluição de longo prazo e ao uso contínuo de combustíveis fósseis como fonte de energia. Segundo Shumal et. al (2020) o aterro sanitário deveria ser a última opção no gerenciamento dos RSU e ser limitado a apenas o mínimo, entretanto é a alternativa dominante em países em desenvolvimento.

5.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CDR PROPOSTO

A caracterização química das amostras coletadas representa fator fundamental para verificar os subprodutos que podem ser gerados a partir da queima do CDR. Desta forma, serão apresentados os valores de zinco, cobre, cádmio, cromo, mercúrio, teor de cinzas e teor de umidade.

Conforme já explicitado anteriormente, mercúrio e cloro são resultados fundamentais para a classificação de um CDR, juntamente com o poder calorífico inferior, sendo o mercúrio a variável ambiental a ser considerada e o cloro a variável que interfere diretamente no processo, ou seja, grandes quantidades podem influenciar na qualidade do cimento.

5.6.1 Teor de Cinzas

O teor de cinzas permite saber a quantidade de produto não queimado e, nos casos de plantas de incineração, prever seu manejo (GALLARDO et. al, 2014). Do ponto de vista ambiental, altos teores de cinzas podem contribuir para as emissões de particulados, do ponto de vista econômico podem representar custos adicionais para a disposição das cinzas e do ponto de vista social e de saúde, os particulados emitidos podem causar problemas respiratórios e bioacumulação (IACOVIDOU et al., 2018).

No caso da utilização do CDR em fornos de cimenteiras, as cinzas são incorporadas ao clínquer, traduzindo a vantagem da utilização do CDR neste ambiente (CARACOL, 2016). As cinzas volantes também podem ser potencialmente vitrificadas e usadas como um produto secundário (RADA; CIOCA; IONESCU, 2017).

A Tabela 8 apresenta os teores de cinzas obtidos para as 24 amostras das três Associações de Catadores utilizadas no estudo, enquanto a Figura 24 apresenta o box plot dos valores identificados.

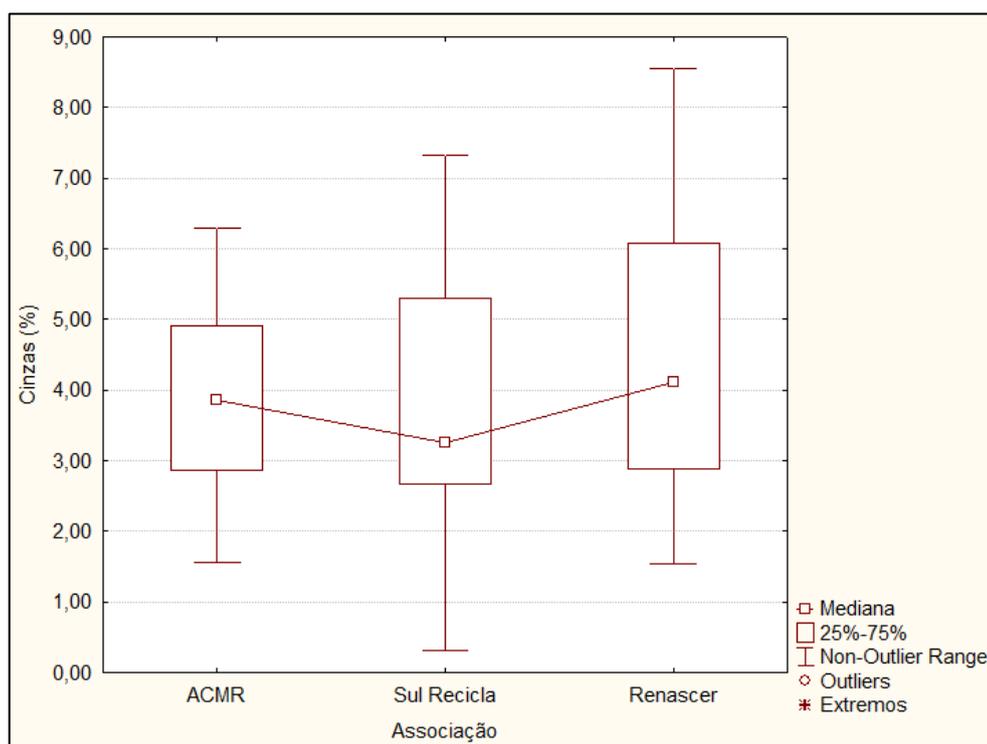
Tabela 8 – Teores de cinzas identificados nas amostras.

Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
1	3,30	2,14	5,65
2	1,60	8,55	5,34
3	3,44	3,08	3,63
4	0,32	6,46	3,85
5	5,32	4,13	3,88
6	3,19	2,98	2,61
7	1,42	2,94	3,28
8	4,92	3,01	6,30
9	5,27	5,09	5,49
10	6,29	5,09	1,55
11	3,14	5,70	2,68

Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
12	6,69	4,54	4,17
13	7,34	2,32	4,92
14	3,98	4,10	3,11
15	5,34	2,83	3,85
16	4,40	2,61	4,89
17	6,07	6,49	4,05
18	2,68	7,24	5,09
19	3,06	2,99	1,94
20	3,03	7,75	3,04
21	3,00	1,54	3,25
22	2,00	2,03	2,00
23	2,68	6,56	4,22
24	2,44	4,14	2,62
Média	3,79	4,35	3,81
Desvio padrão	1,76	1,95	1,24
Variância	3,22	3,97	1,60

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 24 – Box plot dos resultados dos teores de cinza nas Associações analisadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando os dados apresentados na Tabela 8 observa-se que para a Sul Recicla as cinzas variaram entre 0,32% e 7,34%, com uma média de 3,79%, enquanto a Renascer apresentou valores variando entre 1,54% e 8,55%, com uma média de 4,35% e a ACMR teve valores variando entre 1,55% e 6,30%, com uma média de 3,81%. É possível concluir que para

as três Associações os valores médios obtidos encontram-se no intervalo do desvio padrão, indicando que os valores são próximos entre si, o que é comprovado pelo diagrama apresentado na Figura 24.

Os resultados obtidos para o CDR proveniente das três Associação assemelham-se a outros identificados em estudos ao redor do mundo. Em estudo realizado por Kimambo e Subramanian (2014) os teores de cinzas variaram entre 2,8 e 9,2 %, enquanto o estudo de Kara (2012) identificou, em média, um teor de cinzas igual a 7,7%. No estudo de Rahman et al. (2015) a média de teor de cinzas foi de 10,9%.

Para uma análise mais completa dos dados obtidos procedeu-se uma regressão multivariada dos dados, tendo como variável dependente os teores de cinzas e como variáveis independentes as sete categorias utilizadas para o CDR. Tal operação foi necessária para verificar quais categorias tem maior influência na geração de cinzas. Para a ACMR, a regressão multivariada resultou nas categorias leitoso e papel influenciando diretamente na produção de cinzas, enquanto na Renascer o papel foi a única categoria responsável por contribuir significativamente com as cinzas geradas no processo.

5.6.2 Teor de Umidade

O teor de umidade de qualquer resíduo sólido destinado à produção de CDR é uma das propriedades mais significantes, tendo em vista sua influência direta no poder calorífico, indicando também a necessidade de tratamentos adicionais ao resíduo que se tornará combustível (RANIERI et al., 2017).

A Tabela 9 demonstra os resultados obtidos referente ao teor de umidade para as 24 amostras de cada Associação estudada.

Tabela 9 – Teor de umidade identificado nas amostras.

Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
1	0,86	2,01	1,35
2	3,94	1,39	1,46
3	1,24	1,56	1,50
4	1,25	2,33	0,24
5	2,48	0,56	1,56
6	2,03	1,64	1,08
7	3,20	1,24	0,74
8	1,38	0,76	1,59
9	2,86	0,50	0,78
10	2,13	1,53	1,21
11	4,20	1,28	0,89

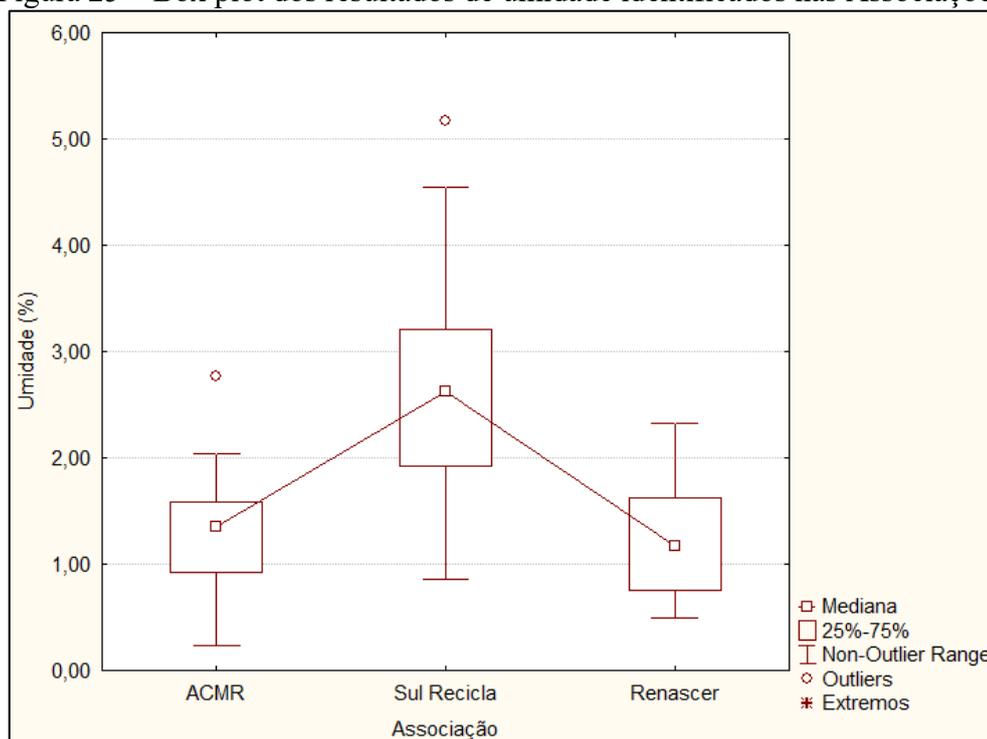
Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
12	3,14	48,83	0,92
13	3,21	1,13	1,87
14	3,68	1,87	1,18
15	4,54	1,16	2,04
16	2,35	0,70	1,74
17	3,11	1,17	2,76
18	2,27	2,31	1,31
19	5,18	0,95	1,37
20	2,73	0,87	1,24
21	1,92	0,75	1,98
22	45,99	0,67	1,57
23	2,62	1,06	14,33
24	1,11	1,63	0,58
Média	4,48	3,25	1,89
Desvio padrão	8,72	9,52	2,65
Variância	76,12	90,59	7,01

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando os dados apresentados na Tabela 9 observa-se que para as três Associações houve pelo menos uma ocorrência de umidade com valor alto, sendo 45,99% para a Sul Recicla, 48,83% para a Renascer e 14,33% para a ACMR. No caso da Sul Recicla e da ACMR, tal fato deve-se ao alto índice pluviométrico ocorrente em Florianópolis no dia que antecedeu a coleta de dados, já na Renascer não houve registro de precipitações no município no dia anterior ou no dia da coleta da amostra, entretanto a quantidade de roupas nos rejeitos era significativa, o que influencia na umidade dos rejeitos como um todo. Este fato sugere que o teor de umidade é muito influenciado tanto pelas condições de fabricação quanto atmosféricas, portanto, diferentes condições de armazenamento das diferentes frações podem resultar em grandes desvios no teor de umidade final (GARCÉS et al., 2016).

De maneira geral, observa-se que a Sul Recicla apresentou os maiores teores de umidade, ocasionados principalmente pelas características do barracão da Associação: rejeitos dispostos em caçamba a céu aberto e caminho entre as mesas de triagem e a caçamba de rejeitos sem piso impermeabilizado, com acúmulo de água em dias de chuva. Retirando-se os valores extremos obtidos para as Associações, observa-se que a média do teor de umidade da Sul Recicla é igual a 2,67% com um desvio padrão de 1,12, da Renascer é igual a 1,26% com um desvio padrão de 0,52 e da ACMR é igual a 1,35 com um desvio padrão igual a 0,53. A média geral de umidade das amostras das três Associações é de 1,76%. A Figura 25 apresenta o box plot dos resultados de umidade por Associação sem os valores extremos identificados, o qual expõe as conclusões identificadas a partir da Tabela 9.

Figura 25 – Box plot dos resultados de umidade identificados nas Associações.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No estudo desenvolvido por Ranieri et al. (2017), na região sul da Itália, o teor de umidade do CDR produzido alcançou o valor médio de 29,2%, enquanto no estudo desenvolvido por Gallardo et al. (2014), na província de Castellón, na Espanha, o teor de umidade dos resíduos de uma planta de tratamento mecânico biológico que seriam destinados para a produção de CDR foi de 34,46% com um desvio padrão de 3,25. No estudo de Gallardo et al. (2014) o alto teor de umidade deve-se principalmente aos rejeitos de banheiro e aos resíduos orgânicos que chegam até a planta estudada.

Brás et al. (2017) identificaram um teor de umidade médio equivalente a 20% proveniente dos rejeitos de um sistema de coleta seletiva por meio de contêineres na região central de Portugal, sendo as amostras analisadas compostas majoritariamente por plásticos, papéis e tecidos. Em estudo desenvolvido na cidade de Isfahan, no Irã, o teor de umidade obtido para os rejeitos de uma planta de tratamento mecânico biológico foi, em média, igual a 39%, o que se deve principalmente a grande quantidade de orgânicos (70,23%) na composição gravimétrica média dos rejeitos.

Conforme evidenciado acima, os teores de umidade são diretamente influenciados pela composição gravimétrica das amostras, principalmente por materiais orgânicos, uma vez que apresentam grande quantidade de umidade incorporada. No presente estudo, os teores de umidade foram muito inferiores aos evidenciados na literatura por dois principais motivos: pela

retirada de resíduos que continham significativa quantidade de umidade previamente à realização das análises e pelo sistema de coleta seletiva em modelo porta-a-porta associado à Associações de Catadores, o qual apresenta maior aproveitamento dos resíduos destinados.

Como em Florianópolis, e no Brasil de maneira geral, o sistema de recuperação de resíduos recicláveis é diferente do que em outros países, não foram identificados estudos semelhantes para comparação direta dos resultados obtidos, indicando a necessidade de pesquisas aprofundadas neste tipo de coleta e aproveitamento, praticado principalmente em países em desenvolvimento.

5.6.3 Cloro

O cloro representa o principal parâmetro técnico para a utilização de CDR para produção de clínquer, uma vez que o cloro enfraquece o clínquer e aumenta os riscos de corrosão das barras de aço em estruturas de concreto armado, além da formação de gases ácidos e a formação de dibenzodioxinas policloradas (CHATZIARAS; PSOMOPOULOS, THEMELIS, 2016; VELIS et al., 2012).

Os teores de cloro em resíduos sólidos urbanos são provenientes principalmente dos plásticos (8,25% em matéria seca), compósitos (2,55% em matéria seca), combustíveis (1,25% em matéria seca) e resíduos alimentares (1,17% em matéria seca) (VICZEK et al., 2020). As maiores concentrações de cloro foram observadas em produtos de PVC, incluindo bainhas e tubos elétricos e em plásticos não embalados, que também podem conter PVC (VICZEK et al., 2020). Além disso, em produtos que não contém PVC, o cloro pode ser proveniente das parafinas cloradas que são usadas em combinação com o antimônio para conferir retardamento à chama às poliolefinas e poliestireno (TROITZSCH, 2016).

Com relação ao presente estudo, os teores de cloro podem estar relacionados às embalagens de alimentos que, segundo Viczek et al. (2020), podem ser originados do conteúdo interior ou da própria embalagem. Níveis elevados de cloro também podem estar relacionados à aplicação de cloreto de polivinilideno (PVDC) como revestimento de embalagens, o qual serve como barreira, reduz a permeabilidade aos sabores e prolonga a vida útil, sendo usado principalmente em embalagens de biscoitos e barras de chocolate (VICZEK et al., 2020).

Tabela 10 – Teores de cloro identificados nas amostras.

Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
1	2,09	1,49	1,34
2	1,41	2,19	1,99

Amostra	Sul Recicla (%)	Renascer (%)	ACMR (%)
3	1,80	1,41	0,96
4	1,84	2,62	4,38
5	1,37	1,72	1,76
6	2,18	1,58	2,72
7	2,20	1,87	2,49
8	4,48	1,05	2,07
9	2,56	1,86	1,23
10	2,42	1,83	1,57
11	2,48	1,61	1,23
12	6,70	3,51	0,64
13	2,60	1,03	1,80
14	2,37	1,20	1,09
15	2,28	1,75	3,39
16	2,10	1,45	1,70
17	1,69	2,24	1,18
18	1,26	0,97	1,22
19	2,08	3,36	1,12
20	2,66	1,64	3,30
21	2,33	2,18	1,72
22	4,41	3,04	1,55
23	1,55	1,37	1,46
24	1,78	1,65	1,52
Média	2,44	1,86	1,81
Desvio padrão	1,17	0,67	0,86

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em todas as Associações os resultados de cloro apresentaram três episódios de desconformidade com o estabelecido pela NBR 16.849/2020, que normatiza os requisitos a serem seguidos para os resíduos com fins de aproveitamento energético. A Associação Sul Recicla foi a que apresentou maior amplitude de resultados, sendo o valor mínimo igual a 1,26% e valor máximo igual a 6,70%, com um valor médio de 2,44% e desvio padrão de 1,17%. A Associação Renascer apresentou a menor amplitude entre todas as Associações estudadas, com um valor médio equivalente a 1,86% e desvio padrão de 0,67%. A Associação ACMR apresentou resultados variando entre 0,64% e 4,38 %, com valor médio de 1,81% e desvio padrão de 0,86%.

Observa-se que para a Associação Sul Recicla, as amostras 8, 12 e 22 apresentaram valores acima de 3%, valor máximo de referência estabelecido pela NBR 16.849/2020. Nestas três amostras, a composição gravimétrica teve mais presença da categoria embalagens de macarrão e afins, as quais podem ter revestimento de cloreto de polivinilideno (PVDC) para

reduzir a permeabilidade aos sabores e prolongar a vida útil, conforme apresentado por Viczek et al. (2020). Para a Associação ACMR as amostras 4, 15 e 20 também apresentaram valores acima de 3% e pode ser explicado pelo mesmo motivo citado anteriormente. Para a Associação Renascer as amostras 12, 19 e 21 apresentaram valores acima de 3%, sendo que para as amostras 12 e 19 a desconformidade se deve ao mesmo motivo apresentado para as outras Associações e para a amostra 21, como a categoria mais representativa da composição gravimétrica foi a embalagem de bolo, a presença de cloro pode estar associada a outros resíduos que entraram em contato com a amostra.

Para a determinação da relação estatística entre a composição das amostras e os resultados de cloro identificados foi realizada a correlação não paramétrica de Spermán para um nível de significância de 95%. A Tabela 11 demonstra as correlações obtidas para a variável cloro.

Tabela 11 – Correlação não paramétrica cloro x categorias.

Correlação	Sul Recicla	Renascer	ACMR
Embalagem Metalizada	0,019	-0,083	-0,088
Macarrão	-0,15	-0,29	0,13
Bolo	0,039	0,12	-0,14
Dois	0,23	0,38	0,31
Isopor	0,063	-0,056	-0,10
Leitoso	-0,18	-0,037	-0,24
Papel	0,064	0,15	0,13

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As variáveis embalagem metalizada, embalagem de bolo, isopor e papel não possuem correlação com as medições de cloro identificadas para a Associação Sul Recicla, evidenciando que estes materiais não influenciam nos teores de cloro identificados nas amostras desta Associação. A maior correlação positiva foi para a categoria dois materiais nas três Associações estudadas, o que pode ser explicado pelas características dos materiais desta categoria, principalmente aditivos que contém PVC ou por aplicação de cloreto de polivinilideno (PVDC) como revestimento de embalagens, conforme exposto por (VICZEK et al., 2020). Para a Associação Renascer, as categorias embalagem metalizada, isopor e leitoso não apresentaram correlação com os resultados de cloro, enquanto para a Associação ACMR apenas a categoria embalagem metalizada não apresentou correlação.

Shumal et al.(2020) em amostras de CDR produzido a partir de tratamento mecânico biológico identificaram teores de cloro variando entre 0,03% e 0,43%, com valor médio de 0,14% e desvio padrão de 0,14%. Gallardo et al. (2014) para amostras secas de CDR identificou

teores de cloro de 0,34%. Bessi et al. (2016) identificou teores de cloro médios de 0,30% para CDR produzido a partir de resíduos de um sistema de coleta porta a porta na Itália. Brás et al. (2017) analisando resíduos de uma planta de tratamento mecânico biológico e rejeitos de coleta seletiva identificou valores médios de cloro de 0,49% com um desvio padrão de 0,10% para CDR a partir de resíduos de tratamento mecânico biológico e 0,22% e desvio de 0,06% para amostras de coleta seletiva.

Comparando os dados da literatura com os dados do presente estudo observa-se que os dados aqui obtidos foram superiores em todos os casos, indicando diferenças no que concerne ao gerenciamento de resíduos sólidos entre países e na composição dos resíduos. Nos estudos comparados não foram detalhadas as composições gravimétricas para que fosse possível tecer comparações entre resultados.

A legislação brasileira sobre resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (NBR 16.849/2020) menciona que os resultados de cloro para um resíduo elegível para a recuperação energética não devem ultrapassar 3,0%. Já Resolução SIMA nº 38/2017, que versa sobre a utilização de RSU para coprocessamento em fornos de produção de clínquer, em seu Art. 5º menciona que o CDR derivado de RSU deve atender um teor de cloro menor ou igual a 1,0%. A Resolução nº 47/2020 da Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo também dispõe de legislação especificando as diretrizes e condições para licenciamento de unidades de preparo de CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR, estabelecendo como teor de cloro máximo na faixa de 1,0%.

5.6.4 Zinco

Teores de zinco podem ser provenientes de vidros e plásticos, sendo que a menor concentração foi encontrada em vidros (55 mg/kg) e a maior concentração em plásticos (259 mg/kg) (GÖTZE et al, 2016). A Tabela 12 apresenta os resultados de zinco identificados nas amostras.

Tabela 12 - Teor de zinco identificado nas amostras.

Amostra	Sul Recicla (mg/kg)	Renascer (mg/kg)	ACMR (mg/kg)
1	74,50	42,95	94,40
2	60,70	55,95	92,90
3	61,00	42,95	78,00
4	34,40	75,20	68,45
5	151,25	66,65	81,50
6	109,25	68,95	101,65

Amostra	Sul Recicla (mg/kg)	Renascer (mg/kg)	ACMR (mg/kg)
7	50,95	111,80	40,05
8	65,95	100,50	56,55
9	122,35	168,45	75,80
10	89,20	67,60	58,05
11	66,00	80,25	38,70
12	57,50	38,75	76,85
13	39,00	59,60	90,60
14	45,55	62,15	80,35
15	44,35	43,90	61,85
16	58,50	36,35	47,40
17	29,95	56,85	53,60
18	48,55	59,35	55,30
19	41,15	34,95	64,55
20	95,80	26,75	77,15
21	61,20	61,60	78,10
22	66,40	27,80	47,20
23	87,40	58,30	58,60
24	38,10	57,45	52,05

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando-se os dados da Tabela 12 é possível observar que a Associação Renascer apresentou o maior valor de zinco, igual a 168,45 mg/kg. A média dos valores de zinco na Associação Renascer foi de 62,71 mg/kg com um desvio padrão igual a 29,86, e um valor mínimo igual a 26,75 mg/kg. A Associação Sul Recicla apresentou valor médio de zinco igual a 66,63 mg/kg, com um desvio padrão de 29,09, valor máximo igual a 151,25 mg/kg e valor mínimo igual a 29,95 mg/kg. A Associação ACMR apresentou uma média 67,90 mg/kg de zinco com um desvio padrão de 17,33, valor máximo igual a 101,65 mg/kg e valor mínimo igual a 38,70 mg/kg.

A relação estatística entre as categorias e os resultados de zinco foi realizada através da correlação não paramétrica de Spearman, em que as variáveis não necessariamente precisam estar normalizadas, para um grau de confiabilidade de 95%. A Tabela 13 demonstra os resultados obtidos para a variável zinco.

Tabela 13 - Correlação categorias x zinco.

Correlação	Sul Recicla	Renascer	ACMR
Embalagem Metalizada	0,17	-0,27	-0,07
Macarrão	-0,14	0,052	-0,09
Bolo	0,37	-0,037	0,00087
Dois	0,36	-0,34	0,14
Isopor	0,14	0,32	0,39

Correlação	Sul Recicla	Renascer	ACMR
Leitoso	0,28	-0,015	0,25
Papel	-0,37	0,10	-0,019

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a Associação Sul Recicla observa-se que as categorias embalagem de bolo e afins e dois materiais foram as que apresentaram maior correlação positiva, ou seja, quanto maior os valores de zinco, maior a representatividade de embalagens de bolo e dois materiais nas amostras, o que concorda com a afirmativa de Götze et al (2016) em que o zinco está presente principalmente na fração de plástico dos resíduos. O papel apresentou correlação negativa para a Associação Sul Recicla, ou seja, quanto menor a quantidade de papel, maior a quantidade de zinco. Para a Associação Renascer observa-se que as categorias embalagem de macarrão e afins, embalagens de bolo, leitoso e papel apresentaram valores muito próximos de zero, o que indica que estas variáveis não influenciam diretamente nos valores de zinco identificados nas amostras desta Associação. Para a Associação Renascer o maior valor de correlação diz respeito à categoria isopor, assim como na Associação ACMR. Ainda para a Associação ACMR observa-se que as categorias embalagem metalizada, embalagem de macarrão, embalagem de bolo, dois materiais e papel apresentam valor de correlação próximo de zero

Sarc e Lorber (2013), analisando o CDR utilizado em um incinerador com leito fluidizado produzido a partir de resíduos domésticos, resíduos comerciais, resíduos volumosos e resíduos de canteiros de obras, identificaram teores médios de zinco iguais a 882 mg/kg de matéria seca e desvio padrão de 126. Zhao et al. (2016) identificaram teores de zinco iguais a 18 mg/kg em CDR produzido em Singapura.

A média dos teores de zinco no presente estudo foi de 65,75 mg/kg com um desvio padrão de 26,16, valor inferior ao estudo de Sarc e Lorber (2013) e superior ao estudo de Zhao et al. (2016), indicando as diferenças de resultados entre os países.

5.6.5 Cobre

O cobre, juntamente com outros metais pesados como o cromo, o mercúrio e o chumbo, é considerado tóxico devido a não-biodegradabilidade e a bioacumulação em organismos vivos (LABIDI et al., 2016). Pode ficar disponível no ambiente através de sua utilização industrial, como por exemplo na confecção de chapas, fios, cabos, na indústria de fertilizantes e na indústria de papel e celulose (LABIDI et al., 2016).

Para o presente estudo, os teores de cobre podem estar relacionados principalmente a quantidade de papeis presente na composição gravimétrica do CDR proposto. A Tabela 14 apresenta os resultados de cobre identificados.

Tabela 14 - Teor de cobre identificado nas amostras.

Amostra	Sul Recicla (mg/kg)	Renascer (mg/kg)	ACMR (mg/kg)
1	Não detectado	Não detectado	Não detectado
2	Não detectado	Não detectado	Não detectado
3	6,50	Não detectado	2,00
4	5,50	Não detectado	Não detectado
5	4,50	Não detectado	Não detectado
6	7,50	Não detectado	Não detectado
7	1,50	Não detectado	Não detectado
8	26,50	Não detectado	Não detectado
9	19,50	Não detectado	3,00
10	28,50	Não detectado	Não detectado
11	6,00	Não detectado	Não detectado
12	8,50	Não detectado	Não detectado
13	24,00	Não detectado	13,50
14	26,00	Não detectado	5,50
15	19,00	Não detectado	Não detectado
16	9,50	Não detectado	Não detectado
17	11,50	Não detectado	0,50
18	31,00	Não detectado	Não detectado
19	16,50	Não detectado	Não detectado
20	25,00	Não detectado	Não detectado
21	29,00	Não detectado	Não detectado
22	14,00	Não detectado	7,50
23	26,00	Não detectado	Não detectado
24	28,00	Não detectado	Não detectado

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando os dados apresentados na Tabela 14 observa-se que nas amostras coletadas na Associação Renascer não foram detectados teores de cobre, bem como em 18 das 24 amostras da Associação ACMR. Na Associação Sul Recicla, em apenas duas amostras não foram identificados teores de cobre. Na ACMR o valor máximo identificado foi de 13,50 mg/kg e o valor mínimo foi de 0,5 mg/kg, com um valor médio de 5,33 mg/kg nas amostras em que o cobre foi identificado. Na Sul Recicla o valor máximo identificado foi de 31,00 mg/kg e o valor mínimo foi de 1,50 mg/kg, com um valor médio de 17 mg/kg e desvio padrão de 9,50.

Da mesma forma que para o zinco, a relação entre as categorias e o teor de cobre das amostras foi realizado através da correlação não paramétrica de Spearman para um grau de

confiabilidade de 95%. Importante ressaltar que para a Associação Renascer não são apresentados resultados uma vez que não foram detectados teores de cobre nas amostras. A Tabela 15 demonstra os resultados obtidos para a variável cobre.

Tabela 15 - Correlação cobre x categorias.

Correlação	Sul Recicla	Renascer	ACMR
Embalagem Metalizada	0,41	-	0,10
Macarrão	-0,21	-	0,075
Bolo	0,57	-	-0,16
Dois	-0,37	-	-0,13
Isopor	0,60	-	-0,099
Leitoso	-0,00044	-	0,26
Papel	-0,36	-	-0,12

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a Associação ACMR as categorias embalagem de macarrão e isopor apresentaram resultados muito próximos de zero, indicando que os teores de cobre nas amostras não têm relação com estas categorias, assim como com a categoria leitoso da Associação Sul Recicla. Ainda com relação a Associação ACMR, a categoria que mais apresentou correlação linear positiva foi a categoria leitoso. Para a Associação Sul Recicla as categorias embalagem de bolo e isopor são as que mais contribuem para os teores de cobre, enquanto as categorias embalagem de macarrão, dois materiais e papel apresentam correlação indireta, ou seja, quanto menor seu valor, maior serão os teores de cobre.

Shumal et al. (2020) identificaram teores de cobre em média de 482,49 mg/kg com um desvio padrão de 640,57, analisado nas cinzas de um CDR produzido a partir de uma planta de tratamento mecânico biológico. Gallardo et al. (2014) identificaram valores médios de cobre igual a 108,92 mg/kg, com um desvio padrão de 45,21, para amostras secas de CDR produzidos a partir de uma planta de tratamento mecânico biológico. Zhao et al. (2016), para um estudo com diversos componentes dos resíduos sólidos urbanos de Singapura, identificaram um teor de cobre igual a 23 mg/kg. Sarc e Lorber (2013), analisando o CDR utilizado em um incinerador com leito fluidizado produzido a partir de resíduos domésticos, resíduos comerciais, resíduos volumosos e resíduos de canteiros de obras, identificaram teores médios de cobre iguais a 892 mg/kg em base seca com um desvio padrão de 230.

Comparando os dados obtidos no presente estudo com os dados da literatura em estudos semelhantes, provenientes de resíduos sólidos urbanos, observa-se que o valor máximo identificado nas amostras foi de 31,00 mg/kg valor inferior a maioria dos estudos analisados, indicando que os teores de cobre não influenciariam na qualidade de um CDR produzido a partir

dos resíduos que sobram do processo de triagem manual das Associações de Catadores de Florianópolis.

5.6.6 Cromo

Têxteis, borrachas, sapatos, couro e suas frações mistas são origens de cromo nos resíduos sólidos, principalmente os artigos em couro, cujo processo de curtimento utiliza a aplicação de sais de cromo (VICZEK et al., 2020).

No presente estudo não foi detectado cromo em nenhuma das amostras, o que pode ser explicado principalmente pelo fato de que os resíduos responsáveis por conter cromo terem sido retirados da composição final do CDR estudado.

No estudo desenvolvido por Shumal et al. (2020) nas cinzas de uma planta de tratamento mecânico biológico foi identificado um teor médio de cromo igual a 90,98 mg/kg com um desvio padrão de 70,57. Já no estudo desenvolvido por Gallardo et al. (2014) o valor médio de cromo identificado foi 135,49 mg/kg com um desvio padrão de 98,70. Zhao et al. (2016), analisando CDR produzido a partir de resíduos coletados em Singapura identificou teores de cromo iguais a 2,6 mg/kg. Valores tão diversos para cada estudo indicam a particularidade de cada região na composição química dos seus resíduos, os quais variam principalmente pela distribuição de renda da população e hábitos de consumo.

5.6.7 Cádmio

Viczek et al. (2020) compilando os dados de 26 estudos que identificaram teores de cádmio em diferentes tipos de resíduos identificaram as maiores concentrações em plásticos (16,50 mg/kg), seguido de compósitos (5,50 mg/kg), metais (5,20 mg/kg), combustíveis (3,93 mg/kg) e materiais inertes (3,28 mg/kg). A presença de cádmio em RSU pode estar associada a baterias e dispositivos eletrônicos, além das frações de PVC que podem conter cádmio e na formação de pigmentos para polipropileno, polietileno e PET (VICZEK et al., 2020).

Nas amostras coletadas para o presente estudo não foi detectado cádmio em nenhuma. Em estudo desenvolvido por Gallardo et al. (2014) o cádmio atingiu valores de 9,80 mg/kg com um desvio padrão de 7,15. Bessi et al. (2016), para um CDR produzido a partir de RSU de uma planta de tratamento mecânico na Itália, identificaram teores de cádmio iguais a 1 mg/kg. Sarc e Lorber (2013) analisando três diferentes composições de CDR a serem utilizados em um incinerador identificaram teores de cádmio variando entre 2 mg/kg (amostra B) e 10 mg/kg

(amostra A), sendo que a composição gravimétrica principal da amostra B era de fração fina, com tamanho de partícula menor do que 16 mm seguida de 19% de plásticos, enquanto a composição gravimétrica principal da amostra A era de 33% de plásticos e 30% de fração fina. No estudo de Zhao et al. (2016) o cádmio apresentou resultados de 0,05 mg/kg, correspondente ao CDR produzido a partir de RSU em Singapura, sendo o menor valor dos estudos analisados. Shumal et al. (2020) para CDR produzido a partir de planta de tratamento mecânico biológico identificaram valor médio de cádmio igual a 0,68 mg/kg com um desvio padrão de 0,63.

5.6.8 Mercúrio

Conforme especifica a norma ABNT NBR 16849/2020, o mercúrio é uma das informações que deve constar no laudo de caracterização de resíduos que serão utilizados para fins de recuperação energética. O mercúrio é um dos pontos fracos para o uso de CDR, mesmo se estiver dentro dos limites permitidos pela legislação, indicando a necessidade de gerenciar adequadamente os quantitativos para limitar os impactos negativos potenciais.

Diferentes materiais tais como compósitos e plásticos, madeira, uma fração mista de couro, cortiça e borracha podem ser considerados portadores de mercúrio (VICZEK et al., 2020). Nos resíduos sólidos urbanos o mercúrio também pode ser proveniente de termômetros de mercúrio e lâmpadas fluorescentes que foram descartadas incorretamente junto com os demais tipos de resíduos (VICZEK et al., 2020). As baterias são a principal fonte de mercúrio em resíduos, juntamente com dispositivos eletrônicos e chegam até os RSU através do descarte incorreto destes materiais (VICZEK et al., 2020). A Tabela 16 apresenta os teores de mercúrio das amostras compostas analisadas.

Tabela 16 - Teor de mercúrio nas amostras analisadas.

Amostra	Sul Recicla		Renascença		ACMR	
	Medida 1 (mg/kg)	Medida 2 (mg/kg)	Medida 1 (mg/kg)	Medida 2 (mg/kg)	Medida 1 (mg/kg)	Medida 2 (mg/kg)
1	0,046	0,093	0,095	0,050	0,189	0,119
2	0,100	0,077	1,083	0,236	0,455	0,537
3	0,073	0,140	0,020	0,124	0,474	0,558
4	0,059	0,058	0,104	0,106	0,228	0,564
5	0,054	0,067	0,091	0,071	0,335	0,273
6	0,063	0,071	0,116	0,093	0,439	0,831
7	0,029	0,047	0,092	0,082	0,273	0,491
8	0,036	0,095	0,034	0,044	0,206	0,158

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Mesmo que todas as amostras estivessem em um tamanho de partícula igual (0,075 mm) e seguissem o mesmo processo de preparo, pode ser que materiais diferentes tenham sido considerados entre as duplicatas. Para a Associação Sul Recicla, o valor máximo obtido para a primeira medida foi de 0,100 mg/kg e o valor mínimo foi de 0,029 mg/kg, com um valor médio igual a 0,057 mg/kg e desvio padrão de 0,021, já para a segunda medida o valor máximo foi de 0,140 mg/kg e o valor mínimo foi de 0,047 mg/kg, com um valor médio igual a 0,081 mg/kg e desvio padrão de 0,027 mg/kg. Para a Associação Renascer, o valor máximo obtido para a primeira medida foi de 1,08 mg/kg, sendo o maior valor de mercúrio observado para todas as Associações, e o valor mínimo foi de 0,020 mg/kg, com um valor médio de 0,204 mg/kg e desvio padrão 0,334 mg/kg, já para a segunda medida da Associação Renascer, o valor médio obtido foi de 0,101 mg/kg e desvio padrão de 0,057 mg/kg, com um valor máximo de 0,236 mg/kg e valor mínimo de 0,044 mg/kg. Para a Associação ACMR, na primeira medida obteve-se um valor médio de 0,0325 mg/kg e desvio padrão de 0,110 mg/kg, com um valor máximo equivalente a 0,474 mg/kg e valor mínimo de 0,189 mg/kg, enquanto na segunda medida o valor médio obtido foi de 0,441 mg/kg e desvio padrão de 0,225 mg/kg, com valor máximo de 0,831 mg/kg e mínimo de 0,119 mg/kg.

Gallardo et al. (2014) identificaram teores de mercúrio iguais a 82,66 mg/kg e desvio padrão de 29,97 em RSU na região de Onda, na Espanha. Para o estudo desenvolvido por Nasrullah et al. (2017) obteve-se valores de mercúrio iguais a 0,20 mg/kg em CDR produzido a partir de resíduos sólidos urbanos.

5.7 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EVITADAS

Para o presente estudo foram adotados três cenários baseados nas metas do setor cimenteiro para a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos. O Roadmap Tecnológico do Cimento considera uma porcentagem de substituição de curto prazo de 15%, sendo este o Cenário 1, uma porcentagem de substituição de médio prazo de 35%, sendo este o Cenário 2 e uma porcentagem de substituição de longo prazo de 55% sendo este o Cenário 3. Utilizou-se os fatores de emissão para coque de petróleo e resíduos municipais (fração não-biomassa) constantes na Ferramenta GHG Protocol Versão 2020.1.2 para dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Os fatores de emissão utilizados são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Fatores de emissão utilizado para o cálculo das emissões atmosféricas.

	Coque	Resíduo
Fator de emissão CO₂ (kg/t)	3425,962	917
Fator de emissão CH₄ (kg/t)	0,105	0,348
Fator de emissão N₂O (kg/t)	0,021	0,0464

Fonte: Adaptado da Ferramenta GHG Protocol versão 2020.1.2.

No coprocessamento de CDR em fornos de produção de clínquer, a substituição direta do combustível primário no processo produtivo representa uma recuperação de energia entre 85 e 95%, a depender das características dos resíduos (GIZ, 2017). A estimativa das emissões atmosféricas foi realizada pela multiplicação dos fatores de emissão e a quantidade de resíduo ou coque de petróleo utilizada e pode ser observada na Tabela 17.

Tabela 17 - Emissões atmosféricas resíduos x coque de petróleo.

	Resíduos			Coque		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Emissões diárias t CO₂	99,04	231,08	363,13	2096,69	1603,35	1110,01
Emissões diárias t CH₄	0,04	0,09	0,14	0,06	0,05	0,03
Emissões diárias t N₂O	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Emissões mensais t CO₂	2971,08	6932,52	10893,96	62900,65	48100,50	33300,35
Emissões mensais t CH₄	1,13	2,63	4,13	1,93	1,48	1,02
Emissões mensais t N₂O	0,15	0,35	0,55	0,39	0,30	0,20
Emissões anuais t CO₂	35652,96	83190,24	130727,52	1887019,62	1443015,00	999010,38
Emissões anuais t CH₄	13,53	31,57	49,61	58,05	44,39	30,73
Emissões anuais t N₂O	1,80	4,21	6,61	11,61	8,88	6,15

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir dos dados da Tabela 17 é possível calcular as emissões atmosféricas evitadas através de diferença entre as emissões provenientes dos resíduos e do coque de petróleo, conforme pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18 - Emissões atmosféricas evitadas pela substituição de coque de petróleo por resíduos.

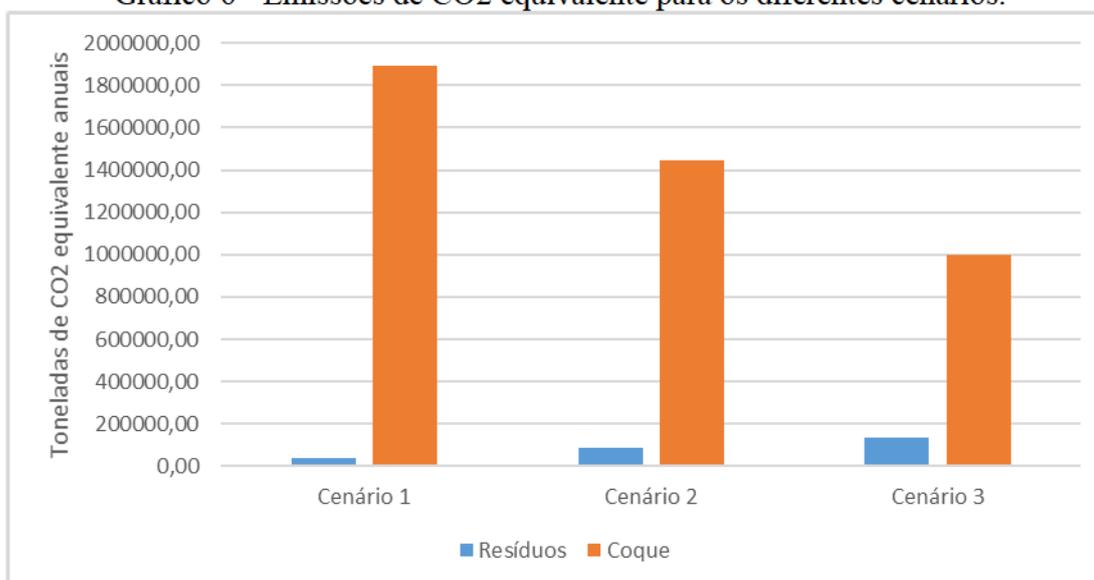
	Emissões Evitadas		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Emissões diárias t CO₂	1997,65	1372,27	746,88
Emissões diárias t CH₄	0,03	-0,038	-0,10
Emissões diárias t N₂O	0,01	-0,0018	-0,01
Emissões mensais t CO₂	59929,57	41167,98	22406,39
Emissões mensais t CH₄	0,81	-1,15	-3,11
Emissões mensais t N₂O	0,24	-0,05	-0,35
Emissões anuais t CO₂	1851366,66	1359824,76	868282,86
Emissões anuais t CH₄	44,52	12,82	-18,88
Emissões anuais t N₂O	9,81	4,67	-0,47

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível observar que tanto para o CH₄ quanto para o N₂O as emissões evitadas tiveram resultado negativo, ou seja, são maiores ao utilizar-se resíduo, isso ocorre pois o fator de emissão destes componentes é maior para os resíduos sólidos, considerando a presença de materiais orgânicos e outros tipos de resíduos que podem contribuir para o aumento da poluição.

Para fins de comparação, todas as emissões foram revertidas para toneladas de CO₂ equivalente, através da multiplicação dos dados obtidos para CH₄ e N₂O por seus respectivos fatores de aquecimento global, sendo 25 para o CH₄ e 298 para o N₂O. O Gráfico 6 apresenta as emissões anuais de CO₂ equivalente para as duas matérias-primas.

Gráfico 6 - Emissões de CO₂ equivalente para os diferentes cenários.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A substituição do coque de petróleo por CDR para a alimentação direta do forno de produção de clínquer permite uma diminuição de 4,83 % das emissões atmosféricas para o Cenário 1, 14,73% para o Cenário 2 e 13,37% para o Cenário 3, o que vai ao encontro do que estabelece o Roadmap Tecnológico do Cimento, que sugere a redução das emissões do setor cimenteiro em 33% a partir do ano de 2019.

5.8 CENÁRIOS ECONÔMICOS PARA UTILIZAÇÃO DE CDR

A determinação dos custos para a implantação de um sistema de produção de CDR faz-se necessária para a análise da viabilidade da adoção desta tecnologia do ponto de vista econômico para utilização em fornos de produção de cimento. Para a estimativa dos custos foram considerados o valor do coque de petróleo em junho de 2021 e a cotação do dólar em 27 de junho de 2021, para que fosse possível a conversão dos custos para reais.

Foram estabelecidos três cenários para a produção de CDR, sendo o primeiro considerando uma alimentação de 720 toneladas de resíduos por dia, o segundo considerando uma alimentação de 118 toneladas por mês e o terceiro considerando uma alimentação de 522 toneladas por dia. O primeiro cenário foi estabelecido levando-se em consideração a disponibilidade dos valores detalhados de operação e manutenção de uma unidade de tratamento mecânico, disponível em estudo desenvolvido na região metropolitana de Curitiba. O segundo cenário foi estabelecido considerando apenas a capacidade das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis de Florianópolis em fornecer matéria-prima para produção de CDR, utilizando-se apenas os resíduos com poder calorífico, retirando-se materiais inertes e resíduos orgânicos, que poderiam influenciar na qualidade do CDR produzido. O terceiro cenário foi construído a partir da geração de resíduos da região da Grande Florianópolis, composta por 22 municípios e com uma geração diária de resíduos estimada em 1.044,93 toneladas por dia, considerando uma população de 1.229.335 habitantes, segundo dados do IBGE, e uma geração per capita de 0,85 kg de resíduos, segundo dados do diagnóstico do SNIS, ano 2019. Para o cenário 3 adotou-se que 50% da geração diária de resíduos poderia se tornar CDR.

O valor inicial de investimento para uma planta de tratamento mecânico de 720 toneladas por dia (Cenário 1) é de R\$43.574.453,67, cuja composição é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Composição de custos de instalação cenário 1.

	Cenário 1 (720t/dia)
Unidade de tratamento mecânico - Primeira trituração, peneira rotativa, separador por ar, separação de metais ferrosos e não ferroso, sensor ótico e trituração final	R\$ 28.905.012,00
Ponte rolante	R\$ 2.956.884,00
Estação de transbordo	R\$ 2.640.075,00
Balança rodoviária 30 toneladas	R\$ 356.500,00
Lote para implantação	R\$ 2.999.931,54
Obras de infraestrutura - Portão, acessos, ligações de água, esgoto e energia	R\$ 541.129,57
Compensação ambiental	R\$ 789.465,31
Construção a área de apoio administrativo	R\$ 235.856,25
Projeto e construção do barracão que vai abrigar a unidade de tratamento mecânico	R\$ 3.492.300,00
Estoque permanente de peças de reposição importadas	R\$ 158.400,00
Construção do barracão para estoque do CDR produzido	R\$ 498.900,00

Fonte: CONRESOL (2020).

Considerando-se a soma de todos os custos equivalentes anualizado e a produção anual de CDR possível para uma planta de 720 toneladas por dia foi possível estimar que para o Cenário 1 o custo do CDR produzido seria de R\$30,27 por tonelada, sem considerar os custos logísticos associados ao envio dos resíduos até a localização da planta e o envio do CDR produzido até a cimenteira mais próxima. Tal resultado comprova a viabilidade econômica da produção de CDR, uma vez que o valor médio da tonelada de coque de petróleo, combustível fóssil amplamente empregado do setor cimenteiro, é de US\$220 ou R\$1084,60 em valores de junho de 2021.

Para o cenário 2, considerando uma capacidade de 118 toneladas mensais e os custos de instalação de 10% com relação ao cenário 1 foi possível estimar que o custo por tonelada de CDR produzido seria de R\$56,15, também demonstrando a viabilidade econômica se comparado ao coque de petróleo.

Para o cenário 3, considerando uma capacidade de 72,5% com relação ao cenário 1, referente a metade dos resíduos gerados na região metropolitana de Florianópolis, o custo por tonelada de CDR produzido seria de R\$33,40 por tonelada.

O CDR é considerado um recurso secundário com limitação em relação às cinzas, presença de cloro e sulfetos, fatores que oneram o preço de venda do CDR (GIZ, 2019). Desta forma, o valor referencial para a venda do CDR é de R\$100,00 por tonelada (GIZ, 2019). A atratividade do preço do CDR também pode ser confirmada pelo coque de petróleo ser comercializado normalmente em dólares, o que leva a uma imprevisibilidade do seu valor final, a depender da valorização da moeda e do preço do petróleo.

O poder calorífico inferior do coque de petróleo utilizado no Brasil equivale a 8.390 kcal/kg, ou seja, o preço do coque de petróleo equivale a R\$1,08 por kg ou R\$0,0001297 por kcal. Para o CDR do presente estudo, considerando um poder calorífico inferior médio de 7525,92 kcal/kg tem-se que o preço do CDR equivale a R\$0,15 por kg ou R\$0,0000193 por kcal. Tal resultado concorda com a afirmativa de que combustíveis alternativos são geralmente mais baratos do que combustíveis fósseis pois a maioria dos combustíveis alternativos são gerados a partir de resíduos que necessitam apenas de custos associados ao processamento (RAHMAN et al., 2013).

6. DISCUSSÃO

As amostras analisadas possuem em sua composição cerca de 75,16% de plásticos, das mais variadas categorias. Neste caso, mesmo considerando todos os esforços no sentido de

reduzir, reusar e reutilizar, ainda restam frações que não são adequadas para seu reaproveitamento, principalmente por aspectos econômicos. Desta forma, a recuperação energética representa uma alternativa a esta fração face ao seu envio para aterros sanitários (STRAZZA et al., 2011). Importante destacar que a adoção de alternativas *waste to energy* não podem ser tratadas como a solução para os problemas de gerenciamento de resíduos sólidos nas cidades brasileiras, sendo necessário a adoção de um completo sistema que envolva outras alternativas antes que os resíduos sejam encaminhados para a recuperação energética.

De maneira geral, o uso de combustíveis alternativos, dentre os quais o CDR, na indústria cimenteira também pode ser analisado sob o ponto de vista ambiental, uma vez que não apenas as fontes primárias de energia são poupadas, mas também os resíduos são utilizados, que de outra forma seriam encaminhados à disposição final ambientalmente adequada (CHATZIARAS; PSOMOPOULOS; THEMELIS, 2016).

A produção de CDR representa uma alternativa válida para o gerenciamento das frações de resíduos sólidos urbanos que não podem ser recicladas (GARCÉS et al., 2016). Entre as opções possíveis ao aterro sanitário, a combustão de resíduos, seja em instalações específicas ou em processos industriais com intensa utilização de energia térmica, é uma opção para resolver os problemas de espaço e perda de materiais valiosos em termos energéticos (GARCÉS et al., 2016). Uma vez que os materiais recicláveis tenham sido recuperados, a combustão do CDR é uma alternativa a ser considerada para resíduos com alto poder calorífico.

Em se tratando da elegibilidade dos RSU para a produção de CDR, as estratégias europeias para a gestão de resíduos sólidos estão relacionadas primeiramente à minimização da geração, seguido de separação na fonte das diferentes frações que compõe os RSU, valorização e disposição final dos rejeitos (GALLARDO et al., 2017). Neste sentido, observa-se que no Brasil um amplo desenvolvimento do setor de resíduos sólidos junto ao poder público ainda precisa ser realizado para que sejam atingidos níveis satisfatórios de aproveitamento dos resíduos sólidos e a consequente diminuição do envio de rejeitos para aterros sanitários.

Com relação à utilização direta de CDR em fornos de produção de clínquer, classifica-se como uma forte opção se comparado a outros processos de combustão, principalmente por ser considerado um método lixo zero, promovendo a diminuição do consumo de combustíveis fósseis com a simultânea recuperação de materiais (SAMOLADA; ZABANIOTOU, 2014). Além disso, a utilização de CDR em fornos de produção de clínquer apresenta benefícios relacionados com a minimização de poluentes tóxicos, como as dioxinas e furanos, ocasionado pela oxidação completa e pelas condições favoráveis de reação (temperaturas na faixa de 2000°C) comparado a outras plantas de combustão operadas em menores temperaturas

(SAMOLADA; ZABANIOTOU, 2014). Entretanto, uma mera transferência de tecnologia entre países, principalmente de primeiro mundo para países emergentes, deve ser atentamente observada, pois as condições de cada país são diferentes, principalmente na questão da matéria-prima, requisitos financeiros e das capacidades locais (GIZ, 2017).

Cabe ressaltar a necessidade de observação constante dos procedimentos de controle de emissões de poluentes, além de um processo de licenciamento ambiental que estabeleça condicionantes adequadas à prevenção da poluição atmosférica que pode ser gerada em decorrência da utilização de CDR. Os RSU com fins energéticos só podem ser destinados à unidades de recuperação energética que possuam um plano de monitoramento das emissões atmosféricas de poluentes, apresentado e aprovado pelo órgão ambiental competente, de forma a assegurar o cumprimento da legislação pertinente (ABNT, 2020).

As diretrizes europeias mencionam que, no máximo, 10% dos resíduos devem ser encaminhados para aterros sanitários, cabendo aos demais 90% a adoção de outras alternativas. Para o caso de Florianópolis, o Plano Florianópolis Lixo Zero 2030 (Decreto nº 18.646/2018) tem como metas o desvio de 60% dos recicláveis secos e 90% dos resíduos orgânicos, ou seja, 40% dos resíduos recicláveis ainda seriam destinados ao aterro sanitário e poderiam ser transformados para a recuperação energética.

No decorrer dos resultados das análises laboratoriais do presente estudo observou-se a grande heterogeneidade das amostras, influenciada principalmente pelas diversas origens dos resíduos, refletidas nos roteiros de coleta praticados pela autarquia responsável pela coleta e seguida destinação às Associações de Catadores. Além disso, as práticas de segregação realizadas por cada Associação, a saber: frações segregadas, modelo de organização, rotatividade de pessoas, também influenciam diretamente no que é descartado em cada local. Com tal heterogeneidade recomenda-se que ao ser produzido CDR a partir dos resíduos restantes do processo de triagem das Associações de Catadores sejam realizados controles rigorosos dos principais componentes químicos de cada amostra utilizada, visando principalmente o controle dos teores de cloro e mercúrio.

Levando em consideração os potenciais efeitos adversos sobre o poder calorífico do CDR, a remoção de determinados resíduos, como os de PVC, por exemplo, pode reduzir as concentrações de contaminantes, principalmente metais, e aumentar a qualidade do CDR produzido (VICZEK et al., 2020). Dependendo da volatilidade, elementos como zinco, cobre, cromo, cádmio e mercúrio podem ser incorporados ao clínquer ou se tornar parte das emissões, por exemplo através da adsorção dos mesmos a pequenas partículas de poeira enquanto resfria (VICZEK et al., 2020).

Os combustíveis derivados de resíduos surgem como uma alternativa viável para a utilização em fornos de produção de clínquer, principalmente pela menor disponibilidade de áreas para a construção de aterros sanitários, a possibilidade de utilização de materiais com potencial energético e os compromissos do setor com a redução das emissões atmosféricas. Para a utilização desta tecnologia, a necessidade de um sistema de coleta seletiva bem estabelecido, a distância das fábricas de cimento em relação aos grandes centros geradores de resíduos, dificuldades de contratos que garantam o suprimento de resíduos e questões técnicas relacionadas ao excesso de cloro podem ser fatores limitantes (VISED, PECCHIO, 2019).

Cabe ressaltar que para além da utilização de RSU como CDR, antes da utilização desta tecnologia, a hierarquia de gerenciamento de resíduos proposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos) deve ser seguida, sendo a redução da geração de resíduos, a reutilização e a reciclagem uma prioridade. Tecnologias como o coprocessamento de CDR vem sendo vistas como solução para o problema do aumento da quantidade de resíduos, assim como pela crescente demanda de energia, porém elas não resolvem o problema de uma forma isolada, sendo necessário a operação de um sistema integrado de gestão de RSU adaptado às condições locais em relação à composição, coleta e reciclagem de resíduos, bem como levar em consideração o sistema informal e os custos associados (GIZ, 2017).

Cada amostra de resíduo destinada à recuperação energética deve apresentar a classificação de acordo com as classes estabelecidas no Quadro 3. A adoção de diferentes classes de resíduos destinados a fins energéticos tem o objetivo de facilitar os procedimentos de controle, autorização e elaboração de relatórios sobre a recuperação energética, indicando as especificações dos lotes (ABNT, 2020). Para determinação da classificação das amostras utilizadas nesta pesquisa foram estabelecidos os valores médios para cada Associação, resultando em três diferentes classificações. A Tabela 20 apresenta a classificação das amostras analisadas de acordo com a NBR 16.849/2020.

Tabela 20 - Classificação das amostras analisadas de acordo com a NBR 16.849/2020.

Associação	Poder Calorífico		Cloro		Mercúrio	
	Medição (kcal/kg)	Classificação	Medição (%)	Classificação	Medição (mg/kg)	Classificação
Sul Recicla	4.680,03	P2	2,93	C3	0,095	H1
Renascer	5.352,55	P1	2,14	C3	0,20	H2
ACMR	6.256,40	P1	2,17	C3	0,56	H3

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao verificar a classificação do CDR analisado de acordo com a NBR 16.849/2020 pode-se afirmar que os rejeitos das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis de Florianópolis podem ser utilizados para a recuperação energética, deixando de serem encaminhados para o aterro sanitário para virarem combustível. Nesse sentido, o que sobra do processo de triagem manual das Associações poderia ser vendido para fábricas produtoras de CDR ou diretamente para a indústria cimenteira, desde que atendidos os requisitos de granulometria, oportunizando uma renda adicional aos catadores. Tal alternativa pode ser considerada dentro do conceito de economia circular, uma vez que os rejeitos estão deixando de ir para o aterro sanitário, lógica linear de fim de vida dos produtos, para a recuperação da energia térmica presente nos resíduos, fazendo com que o ciclo do resíduo seja fechado.

A Resolução nº 38/2017, em seu Art. 5º menciona que o CDR derivado de RSU deve atender às seguintes características: Poder calorífico inferior maior ou igual a 3583 kcal/kg na base seca; teor de cloro menor ou igual a 1,0% e teor de mercúrio menor ou igual a 0,5 mg/kg. Comparando os resultados obtidos no presente estudo com os valores de referência do Art. 5º da referida legislação, apenas o poder calorífico atenderia aos requisitos para todas as Associações e o teor de mercúrio seria atendido apenas para a Associação Sul Recicla.

São fatores determinantes para a classificação do CDR de acordo com o Art. 16º da Resolução SIMA nº47/2020: Poder calorífico inferior, porcentagem de cloro e temperatura. Para a utilização de CDR em fornos de produção de clínquer, o Poder calorífico inferior deve ser superior a 2775 kcal/kg, o teor de cloro deve ser menor do que 1,0% e a temperatura não é aplicável neste caso. Desta forma, considerando o CDR produzido a partir dos rejeitos das Associações de Catadores estudadas, o mesmo não poderia ser destinado para fornos de produção de clínquer, uma vez que o poder calorífico inferior médio das Associações está de acordo com o preconizado pela norma, com valores mínimos medidos de 4.680,03 kcal/kg mas com teores de cloro acima de 1,0%, variando entre 2,14% e 2,96% nas Associações estudadas.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos no presente estudo foi possível observar a grande heterogeneidade das amostras que fazem parte dos rejeitos das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis do município de Florianópolis. Tal fato deve-se principalmente à organização, gestão e métodos de cada Associação, as quais ocorrem de maneira diferente em

cada uma delas, refletindo no que é triado e considerado rejeito por cada uma. Os compradores de materiais são diferentes em alguns casos, o que influencia nos tipos de materiais que são comercializados, principalmente os plásticos. Além disso, a alta rotatividade dos membros de cada Associação podem influenciar na qualidade dos resíduos aproveitados e nos rejeitos gerados, indicando a necessidade constante de treinamentos. Tal constatação leva a conclusão de que não é possível analisar os dados das Associações em conjunto, o que pode ser comprovado pelos resultados das análises químicas bem diferentes entre uma Associação e outra.

Não foram observadas diferenças significativas de geração das diferentes categorias entre os períodos de inverno e verão, possivelmente pela diminuição de turistas no ano de 2020 provocada pela pandemia de COVID19. Dos 52 roteiros de coleta praticados 44 foram analisados em algum momento da pesquisa, representando 84,62% dos resíduos encaminhados para as Associações estudadas. Embora a representatividade de roteiros não seja 100%, todas as regiões do município foram contempladas pelas análises, confirmando a representatividade das amostras analisadas.

Com relação à granulometria dos componentes brutos dos rejeitos observou-se que para a Associação Renascer cerca de 58% da amostra apresentou granulometria variando entre 100 e 200 mm, para a Associação ACMR 50% corresponde a uma granulometria entre 150 e 250 mm e para a Associação Sul Recicla cerca de 69% apresentou granulometria entre 200 e 300 mm. Isto indica a necessidade de trituração dos rejeitos para que os mesmos possam ser utilizados em fornos de produção de clínquer, evidenciando a necessidade de uma estrutura de preparo para a produção de CDR.

A composição gravimétrica das categorias roupas e calçados, orgânicos e vidros e restos apresentou-se muito variável, com desvio padrão por vezes superior ao valor médio obtido, indicando a grande variabilidade destas categorias, tendo em vista que as mesmas nem sempre eram identificadas nas amostras. Retirando-se estas categorias que podem prejudicar a qualidade do CDR final, 60,29% da quantidade de rejeitos das Associações permanece e representa a possibilidade de 118 toneladas mensais para a produção de CDR. Tal quantitativo diário não justificaria os investimentos em uma estrutura para produção de CDR apenas para o município de Florianópolis, indicando a necessidade de encaminhar resíduos de mais municípios, desviando-os do aterro sanitário em prol da recuperação energética.

Um dos principais fatores, citado em todas as legislações para uso de resíduos para fins energéticos, é o poder calorífico inferior. Os resultados obtidos no presente estudo demonstram um poder calorífico inferior médio de 5.429,66 kcal/kg, indicando a atratividade

do *blend* de rejeitos para a produção de CDR e coprocessamento em fornos de produção de clínquer.

Com relação ao teor de cinzas das amostras analisadas é possível concluir que os resultados estão abaixo de outros estudos semelhantes, também identificando a atratividade do uso dos rejeitos das Associações como CDR. Da mesma forma, os teores de umidade apresentaram valores mais baixos do que os da literatura, principalmente porque os resíduos componentes do CDR proposto são secos, como plásticos e papéis, possuindo pouca umidade associada.

O cloro, assim como o poder calorífico e o teor de mercúrio, é fator determinante para a elegibilidade de um *blend* de rejeitos para fins energéticos. Com os resultados obtidos é possível concluir que os valores estão relativamente altos, ocasionado principalmente pela presença de embalagens contendo cloreto de polivinilideno (PVDC) como revestimento. Desta forma, para a utilização do *blend* de rejeitos como CDR seria necessário um maior controle dos componentes que podem conter cloro.

Dos metais analisados, cromo e cádmio não foram identificados nas amostras. Os valores de cobre obtidos foram menores do que na maioria dos estudos da literatura analisados, indicando que os teores de cobre não influenciariam na qualidade do CDR produzido. O zinco foi o único metal presente em todas as amostras, principalmente porque ele pode ser proveniente dos plásticos, que representa a maior parcela dos resíduos analisados.

As análises de mercúrio apresentaram valores que podem ser considerados altos, tendo em vista os limites estabelecidos pela legislação vigente, principalmente nas Associações Renascer e ACMR. Tal fato pode estar relacionado com a destinação incorreta de lâmpadas que contém mercúrio juntamente com os resíduos que são encaminhados para a coleta seletiva.

Se tratando da comparação das emissões atmosféricas geradas pelo coque de petróleo e pelos resíduos, observa-se que ao substituir o coque por resíduo há uma redução de 4,83% nas emissões de toneladas de CO₂ equivalente para o Cenário 1, 14,73% para o Cenário 2 e 13,37% para o Cenário 3, indicando a viabilidade do ponto de vista ambiental e indo ao encontro das expectativas do setor cimenteiro, que busca a redução de 33% das emissões até o ano de 2050.

Conclui-se que a produção de CDR também apresenta viabilidade econômica, se observados apenas os custos de implantação e operação de uma estrutura para tal. Para o Cenário 1 verificou-se que a tonelada do CDR produzido custa R\$30,27, para o Cenário 2 custa R\$56,18 e para o Cenário 3 custa R\$33,40. Considerando o custo de venda de CDR igual a R\$100 a tonelada, conclui-se que todos os cenários apresentam-se positivos. O preço do coque

de petróleo em junho de 2021 era de R\$1.084,60, também indicando a atratividade da substituição do CDR.

Em comparação com a Resolução SMA nº 38/2017 e Resolução SIMA nº 47/2020 o CDR analisado apresentou apenas valores de poder calorífico inferior em conformidade, sendo que os teores de cloro e mercúrio não atingiram o nível de qualidade exigido por tais Resoluções. Entretanto, com relação à classificação estabelecida pela NBR 16.849/2020, que estabelece os requisitos para aproveitamento energético dos RSU, todas as Associações obtiveram valores em conformidade com alguma das categorias, sendo que o CDR produzido na Associação Sul Recicla foi classificado como P2 C3 H1, o CDR produzido na Associação Renascer foi classificado como P1 C3 H2 e o CDR produzido na Associação ACMR foi classificado como P1 C3 H3.

De maneira geral, os resultados obtidos no presente estudo são satisfatórios e atestam a viabilidade energética, ambiental e econômica da utilização dos rejeitos das Associações de Catadores de Materiais Recicláveis de Florianópolis como matéria-prima para a produção de CDR e posterior utilização como combustível para coprocessamento em fornos de produção de clínquer. Os teores de cloro e de mercúrio são fatores de atenção para a qualidade do CDR produzido, visto que não ficaram em conformidade com duas das legislações analisadas.

7.2 RECOMENDAÇÕES

A título de recomendações, sugere-se a realização de pesquisa semelhante com os RSU que chegam ao aterro sanitário de Biguaçu, uma vez que o mesmo recebe resíduos de toda a grande Florianópolis e poderia ter montante suficiente que justificasse a implantação de uma estrutura para a produção de CDR. Eventualmente, as cidades de Blumenau e Itajaí poderiam, tal como Florianópolis, compor uma massa de rejeitos interessante para o uso como CDR. A simulação ou queima do CDR em condições reais em um forno de produção de clínquer como combustível principal, com monitoramento do processo, também seria interessante para verificar os possíveis subprodutos que podem ser gerados no processo e a eficiência do processo de queima.

Recomenda-se também a inclusão dos custos logísticos do envio dos resíduos até a estrutura de produção do CDR e posteriormente até o local de sua utilização para uma análise econômica completa, verificando principalmente se no estado de Santa Catarina haveria alguma

região possível de receber uma estrutura deste tipo, considerando as distâncias entre os grandes municípios geradores de resíduos e as fábricas de produção de clínquer.

Recomenda-se a inclusão de mais testes para a análise química do CDR, observando o disposto no item 5.5 da NBR 16.849/2020, a saber: antimônio, arsênio, berílio, chumbo, cobalto, estanho, manganês, níquel, platina, paládio, ródio, selênio, tálio, telúrio e vanádio, além de análises de enxofre e flúor, fatores que podem influenciar na qualidade do cimento.

Por fim, para que se possa recuperar os rejeitos da coleta seletiva como alternativa eficiente de valorização energética, aumentando-se os índices de recuperação de materiais recicláveis nas cidades, faz-se necessário estudar alterações do layout das Cooperativas e Associações de Catadores, implementando instalações e equipamentos para pré-tratamento dos resíduos utilizados para fins energéticos (trituração, compactação e enfardamento dos diferentes tipos de materiais). Para isso, seria necessária a adoção de, no mínimo, três linhas diferenciadas de seleção de materiais: 1. Materiais para reciclagem tradicional; 2. Materiais para a recuperação; e 3. Materiais que não foram enquadrados nas outras categorias, além de capacitação frequente dos catadores e incentivos econômicos para a realização da atividade de catação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂRINA, Dace et al. Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: the case studies in Latvia and Lithuania. **Environmental And Climate Technologies**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 112-118, 1 nov. 2020. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/rtuct-2020-0090>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Brasileira nº NBR 8419 Versão Corrigida:1996, de 30 de abril de 1992. **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ.

_____. Norma Brasileira nº NBR 10.004, de 31 de maio de 2004. **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, RJ.

_____. Norma Brasileira nº NBR 10.007, de 31 de maio de 2004. **Amostragem de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, RJ.

_____. Norma Brasileira nº NBR 16.849, de 10 de fevereiro de 2020. **Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ.

ALMEIDA, Francieli Aparecida de et al. Cooperativas de Catadores de Resíduos e Cadeias Logísticas Reversas: Estudo de Dois Casos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s.l.], v. 17, n. 17, p.3376-3387, 13 fev. 2014. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117010911>.

AMARAL, C. et al. BRASIL: Resíduos Sólidos e Coleta Seletiva. **Psicologia e Saúde em debate**, v. 4, n. Suppl1, p. 56-56, 12 dez. 2018.

AMARO, Aurélio Bandeira. Profissão catador: origem e sistematização no processo produtivo. In: AMARO, Aurélio Bandeira; VERDUM, Roberto. **Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas interfaces com o espaço geográfico: entre conquistas e desafios**. Porto Alegre: Letra1, 2016. p. 234-248.

AMPLA CONSULTORIA E PLANEJAMENTO. **Plano Municipal de Coleta Seletiva: Produto 1 - Relatório Parcial 1 – Diagnóstico** contendo: origem e volume dos resíduos, formas de destinação e disposição final adotadas e o modelo atual de coleta seletiva. Florianópolis: Prefeitura de Florianópolis, 2014. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/24_08_2016_15.21.39.ef559b0ca6f64db680871cece918378.pdf>. Acesso em: 04 set. 2019.

BALDISSARELI, Adriana et al. **Considerando mais o lixo**. 2. ed. Florianópolis: Copiart, 2009. 92 p. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/29_02_2012_18.45.04.7077a606f3fda0d488e445bd509fb45b.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BARROS, Regina Mambeli et al. Design and implementation study of a Permanent Selective Collection Program (PSCP) on a University campus in Brazil. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 80, p.97-106, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.005>.

BESSI, C. et al. Solid recovered fuel: an experiment on classification and potential applications. **Waste Management**, [S.L.], v. 47, p. 184-194, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.012>.

BESSEN, Gina Rizpah et al. **Gestão da coleta seletiva e de organizações de catadores: indicadores e índices de sustentabilidade**. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública/USP, 2016. 56 p. Fundação Nacional de Saúde; Universidade de São Paulo; Women in Informal Employment: Globalizing and Organizing.

BRÁS, Isabel et al. Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 120, p.349-356, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217327972>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

BRASIL. **Decreto nº 5.940**, de 25 de outubro de 2006. Institui a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis e dá outras providências. Brasília, DF, 25 out. 2006. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Decreto/D5940.htm>. Acesso em: 25 ago. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 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, 02 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 25 ago. 2019.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 274**, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. Brasília, DF, 02 maio 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>>. Acesso em: 15 maio 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020. 244 p.

BRINGHENTI, Jacqueline. **Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos: Aspectos Operacionais e da Participação da População**. 2004. 316 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saúde Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CAMPOS, Heliana Kátia Tavares. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 85, p.130-138, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.017>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913002243>>. Acesso em: 02 maio 2019.

CAVALCANTE, Livia Poliana Santana; SILVA, Monica Maria Pereira da. Influência da Organização de Catadores de Materiais Recicláveis em Associação para a Melhoria da Saúde e

Minimização de Impactos Socioambientais. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p.01-13, jan. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/15010/pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

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, abr. 2021.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **Pesquisa Ciclossoft 2018**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclossoft/id/8>>. Acesso em 19 out. 2019.

CHATZIARAS, Nickolaos; PSOMOPOULOS, Constantinos S.; THEMELIS, Nickolas J.. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 178-193, 14 mar. 2016. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/meq-01-2015-0012>.

CONKE, Leonardo Silveira; NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras: uma avaliação metodológica. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.199-212, abr. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.010.001.ao14>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/urbe/v10n1/2175-3369-urbe-10-1-199.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

CONRESOL - CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL PARA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira (EVTE)**. Curitiba: Conresol, 2020. 120 p. Disponível em: <https://mid.curitiba.pr.gov.br/2020/00290035.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

DIAS, Sylmara Lopes Francelino Gonçalves. **Catadores: uma perspectiva de sua inserção no campo da indústria de reciclagem**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) - Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. doi:10.11606/T.90.2009.tde-25102010-231013. Acesso em: 2019-08-20.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.685-698, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020040129347>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v20n4/1413-4152-esa-20-04-00685.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2019.

DUTTA, Kasturi; DAVEREY, Achlesh; LIN, Jih-gaw. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 69, p.114-122, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.044>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114001359>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira van. **Redução de emissões na disposição final** / Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf. Acesso em: 25 jun. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (Brasil). **Balço Energético Nacional 2020**: Ano base 2019 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2020. 264 p.

EZEAH, Chukwunonye; FAZAKERLEY, Jak A.; ROBERTS, Clive L.. Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. **Waste Management**, [s.l.], v. 33, n. 11, p.2509-2519, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.06.020>.

EUROPEAN COMMISSION. **Metodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool) - User Version**. Austria: e, 2004. Disponível em: <<https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2019.

FARIAS, Bruno Cezar Fernandez; VERDUM, Roberto. Gestão de Resíduos Sólidos em Rio Grande/RS: sistema de coleta seletiva. In: AMARO, Aurélio Bandeira; VERDUM, Roberto. **Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas interfaces com o espaço geográfico: entre conquistas e desafios**. Porto Alegre: Letral, 2016. p. 310-321.

FLORIANÓPOLIS, Prefeitura Municipal de. **Plano Municipal de Coleta Seletiva: Versão Final**. Florianópolis: Prefeitura, 2016. 132 p. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/25_11_2016_14.57.47.8629ead8c3806b459007d7c3cfe54719.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2019.

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos. In: FRICKE, Klaus;

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

GALLARDO, Antonio et al. Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 83, p.118-125, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.085>.

GALLARDO, Antonio et al. Analysis of the waste selective collection at drop-off systems: case study including the income level and the seasonal variation. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 30-38, 27 out. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x17733539>.

GARCÉS, Diego et al. Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. **Waste Management**, [S.L.], v. 47, p. 164-173, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.029>.

GENON, G.; BRIZIO, E.. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.2375-2385, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022>.

GEORGIOPOULOU, Martha; LYBERATOS, Gerasimos. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 216, p.224-234, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.017>.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIZ, Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (Org.). **Alternativas em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**: um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento. Eschborn: Giz, 2017. 57 p.

GIZ, Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (Org.). **Caderno Temático: Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília: Plansab - Plano Nacional de Saneamento Básico, 2019. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2019.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. 7 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-09102003-112552/pt-br.php>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

GÖTZE, Ramona *et al.* Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: overview of data in literature. **Waste Management**, [S.L.], v. 49, p. 3-14, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.008>.

GONÇALVES, José E.; SARTORI, Maria M. P.; LEÃO, Alcides L.. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 13, p.657-661, jan. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n5/v13n05a21.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

GÜERECA, Leonor Patricia; TORRES, Nathalia; JUÁREZ-LÓPEZ, Claudia Roxana. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 107, p.741-748, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085>.

HOMSE, Rafael Arrobas Martins. **Resíduos Descartados Como Rejeitos Por Cooperativa de Catadores**: composição e análise de perda de receita. 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

IACOVIDOU *et al.* Technical properties of biomass and SRF co-fired with coal: Impact on multi-dimensional resource recovery value. **Waste Management**. 73, 535-545. 2018. doi:10.1016/j.wasman.2017.07.001.

IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>>. Acesso em: 29 nov. 2019.

JARDIM, Arnaldo; YOSHIDA, Consuelo; MACHADO FILHO, José Valverde (Org.). **Política Nacional, Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Barueri: Manole Ltda., 2012. 732 p.

KARA, Mustafa. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 68, p.21-28, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.

KATHIRAVALE, S. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste*. **Fuel**, [S.L.], v. 82, n. 9, p. 1119-1125, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-2361\(03\)00009-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-2361(03)00009-7).

KERBER, Jaqueline Carneiro et al. Preliminary study for implementation of voluntary delivery points of expanded polystyrene: a case in southern brazil. **Production**, [S.L.], v. 30, p. 1-13, mar. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.20190069>.

LABIDI, Abdelkader *et al.* Adsorption of copper on chitin-based materials: kinetic and thermodynamic studies. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [S.L.], v. 65, p. 140-148, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.030>.

LIMA, Francisco P. A. et al. **Prestação de Serviços de Coleta Seletiva por Empreendimentos de Catadores: Instrumentos Metodológicos para Contratação**. Belo Horizonte: Insea, 2013.

LIMA, Rosimeire Midori Suzuki Rosa. **Implantação de um Programa de Coleta Seletiva Porta a Porta Com Inclusão de Catadores: Estudo de caso em Londrina-PR**. 2006. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006. Disponível em: <<http://www.uel.br/pos/enges/dissertacoes/29.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

LOPES, Luciana. **Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos – alternativas para pequenos municípios**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-01102008-162337/pt-br.php>. Acesso em: 25 abr 2019.

MADLOOL, N.a. et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.2042-2060, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.

MARSHALL, Rachael E.; FARAHBAKHS, Khosrow. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste Management**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 988-1003, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.023>.

MLAKAR, Tanja Ljubič et al. Mercury species, mass flows and processes in a cement plant. **Fuel**, [S.L.], v. 89, n. 8, p. 1936-1945, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.009>.

MELO, Diogenes Aires de et al. Avaliação QualiQuantitativa Dos Rejeitos Gerados Nas Cooperativas De Catadores De Materiais Recicláveis No Município De Goiânia, Brasil. **Terceiro Incluído**, Goiânia, v. 9, n. 1, p. 209-225, jan. 2019.

MOKRZYCKI, Eugeniusz; BOCHEŃCZYK, Alicja Uliasz-. Alternative fuels for the cement industry. **Applied Energy**, [s.l.], v. 74, n. 1-2, p.95-100, jan. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0306-2619\(02\)00135-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0306-2619(02)00135-6).

MOKRZYCKI, Eugeniusz; ULIASZ-BOCHEŃCZYK, Alicja; SARNA, Mieczysław. Use of alternative fuels in the Polish cement industry. **Applied Energy**, [s.l.], v. 74, n. 1-2, p.101-111, jan. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0306-2619\(02\)00136-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0306-2619(02)00136-8).

MOURA, J.M.B.M.; PINHEIRO, I. Gohr; CARMO, J.L.. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. **Waste Management**, [S.L.], v. 74, p. 98-109, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.011>.

NASRULLAH, Muhammad et al. Influence of input waste feedstock on solid recovered fuel production in a mechanical treatment plant. **Fuel Processing Technology**, [S.L.], v. 163, p. 35-44, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.034>.

NITHIKUL, Jidapa; KARTHIKEYAN, Obuli. P.; VISVANATHAN, C.. Reject management from a Mechanical Biological Treatment plant in Bangkok, Thailand. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 55, n. 4, p.417-422, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.004>.

PAOLO, Massarini; PAOLA, Muraro. RDF: From Waste to Resource – The Italian Case. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 81, p.569-584, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.136>.

PASCHOALIN FILHO, João et al. Comparação entre as Massas de Resíduos Sólidos Urbanos Coletadas na Cidade de São Paulo por Meio de Coleta Seletiva e Domiciliar. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s.l.], v. 3, n. 3, p.19-33, 1 dez. 2014. University Nove de Julho. <http://dx.doi.org/10.5585/geas.v3i3.208>.

PEREIRA, Christiane; BAGNATI, Marius. **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. p. 41-64.

PIAIA, Eduarda. **Diagnóstico da Presença de Rejeitos nos Resíduos Encaminhados à Coleta Seletiva em Florianópolis**. 2017. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/191294>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

PICHTTEL, J. (2005) Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial. Boca Raton: Taylor & Francis. 649 p. Acesso em: 18 jul 2019.

PINTO, Sofia Cristina de Oliveira Patrício da Silva. **Caracterização de Combustíveis Derivados de Resíduos Obtidos a Partir de Resíduos Industriais Não Perigosos**. 2009. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Integrada e Valorização de Resíduos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/13738/1/Pinto_2009.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2019.

PINZ, Greice Moreira. **A responsabilidade ambiental pós-consumo e sua concretização na jurisprudência brasileira**. Revista de Direito Ambiental. v.65, p.153, jan. 2012.

RADA, Elena Cristina; RAGAZZI, Marco. Selective collection as a pretreatment for indirect solid recovered fuel generation. **Waste Management**, [s.l.], v. 34, n. 2, p.291-297, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.013>.

RADA, Elena Cristina; CIOCA, Lucian-Ionel; IONESCU, Gabriela. Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective. **Matec Web Of Conferences**, [S.L.], v. 121, p. 05006, 2017. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201712105006>.

RAHMAN, Azad et al. Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 56, p.393-400, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.138>.

RAHMAN, Azad et al. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, [s.l.], v. 145, p.84-99, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.029>.

RANIERI, Ezio et al. Sampling, characterisation and processing of solid recovered fuel production from municipal solid waste: an italian plant case study. **Waste Management & Research**, [S.L.], v. 35, n. 8, p. 890-898, 13 jul. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x17716276>.

REZA, Bahareh et al. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 81, p.105-114, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.

Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina: contrato administrativo n. 012/2016./ Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável, Diretoria de Saneamento e Meio Ambiente. Florianópolis: SDS, 2018.

SAMOLADA, M.C., ZABANIOTOU, A.A., 2014. Energetic valorization of SRF in dedicated plants and cement kilns and guidelines for application in Greece and Cyprus. *Resour., Conserv. Recycl.* 83, 34–43.

SARC, R.; LORBER, K.e.. Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). **Waste Management**, [s.l.], v. 33, n. 9, p.1825-1834, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.004>.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **As principais diferenças entre associação e cooperativa**. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/artigosCoperacao/entenda-as-diferencas-entre-associacao-e-cooperativa,5973438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

SHUMAL, Mohammad et al. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refused Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 146, p.404-413, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.173>.

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de et al. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum. Technology**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 127-133, 31 mar. 2004. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v26i2.1510>.

SOUZA, Maria Aparecida de; SILVA, Monica Maria Pereira da; BARBOSA, Maria de Fátima Nóbrega. Os catadores de materiais recicláveis e sua luta pela inclusão e reconhecimento social no período de 1980 a 2013. **Revista Monografias Ambientais - Remoa: Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p.3998-4010, dez. 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/viewFile/15145/pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

STRAZZA, C. et al. Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 19, n. 14, p.1615-1621, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.014>.

TROITZSCH, J., 2016. Flammschutzmittel. In: Maier, R.-D., Schiller, M. (Eds.), *Handbuch Kunststoff-Additive*. 4th ed. Carl Hanser Verlag, München, pp. 1015–1068.

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>.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo (org.). **Roadmap Tecnológico do Cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: Snic, 2019. 64 p.

USÓN, Alfonso Aranda et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 23, p.242-260, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>.

VALIULLIN, Timur R.; EGOROV, Roman I.; STRIZHAK, Pavel A.. Combustion of the waste-derived fuel compositions metallized by aluminium powder. **Combustion And Flame**, [s.l.], v. 182, p.14-19, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.04.009>.

ZHAO, Lei et al. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. **Sustainable Environment Research**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.51-54, jan. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.003>.

APÊNDICE A – Composição gravimétrica das amostras de cada Associação de Catadores estudada;

Tabela 21 - Composição gravimétrica dos rejeitos ACMR.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagem de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
1	10/03/2020	2,40%	6,33%	4,23%	0,90%	3,72%	28,00%	2,03%	1,95%	1,91%	48,51%
2	12/06/2020	3,30%	23,10%	10,69%	1,87%	4,73%	10,47%	0,00%	2,87%	11,12%	31,85%
3	23/06/2020	1,96%	16,90%	6,86%	0,67%	3,49%	16,47%	0,00%	2,27%	5,02%	46,36%
4	28/07/2020	6,69%	21,79%	15,02%	2,80%	8,56%	34,47%	3,42%	1,95%	5,29%	0,00%
5	05/08/2020	3,72%	19,69%	16,59%	6,05%	15,97%	15,97%	0,00%	2,33%	19,69%	0,00%
6	18/08/2020	5,15%	19,66%	19,66%	4,63%	15,77%	22,71%	0,00%	2,84%	9,57%	0,00%
7	25/08/2020	3,84%	28,26%	25,38%	5,62%	9,88%	18,79%	0,00%	2,19%	6,04%	0,00%
8	15/09/2020	4,02%	11,07%	7,58%	2,45%	3,15%	11,31%	35,55%	3,55%	16,67%	4,66%
9	01/10/2020	4,67%	27,89%	17,97%	4,43%	12,49%	8,52%	6,30%	8,28%	9,45%	0,00%
10	07/10/2020	5,64%	16,49%	11,99%	4,50%	9,08%	25,57%	7,32%	1,85%	12,79%	4,76%
11	23/10/2020	6,43%	21,91%	23,56%	4,38%	7,59%	13,83%	12,07%	3,41%	6,82%	0,00%
12	26/10/2020	2,84%	9,49%	9,29%	1,66%	5,96%	19,68%	42,00%	3,53%	5,54%	0,00%
13	30/10/2020	7,00%	19,70%	11,84%	6,57%	6,46%	16,79%	4,52%	6,03%	21,10%	0,00%
14	06/11/2020	2,38%	7,53%	6,57%	1,02%	4,36%	18,06%	56,63%	1,30%	2,15%	0,00%
15	18/11/2020	4,97%	30,25%	17,13%	6,77%	9,12%	11,74%	0,00%	4,42%	15,61%	0,00%
16	23/11/2020	4,77%	20,26%	13,16%	2,06%	5,29%	24,13%	0,00%	5,94%	24,39%	0,00%
17	26/11/2020	6,73%	21,67%	15,25%	2,99%	7,32%	1,49%	2,99%	1,49%	40,06%	0,00%
18	30/11/2020	3,85%	16,83%	9,21%	3,27%	5,28%	18,76%	30,74%	2,26%	9,80%	0,00%
19	09/12/2020	9,15%	24,73%	20,22%	5,33%	9,84%	13,39%	8,47%	5,33%	3,55%	0,00%
20	11/12/2020	5,46%	23,93%	5,72%	1,95%	8,19%	31,21%	1,56%	3,51%	9,36%	9,10%
21	15/12/2020	5,21%	23,44%	19,14%	5,89%	5,44%	23,33%	0,00%	2,60%	14,95%	0,00%
22	21/12/2020	7,27%	25,14%	11,33%	2,21%	6,72%	22,10%	15,56%	3,22%	4,24%	2,21%
23	22/12/2020	1,73%	22,74%	10,40%	0,00%	10,40%	27,94%	0,00%	1,93%	24,86%	0,00%
24	05/01/2020	6,05%	19,73%	14,29%	2,06%	8,35%	24,21%	11,99%	2,06%	11,26%	0,00%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 22 - Composição gravimétrica dos rejeitos Sul Recicla.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagens de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
1	12/03/2020	2,78%	10,16%	5,12%	2,08%	1,28%	29,51%	3,71%	2,08%	3,18%	40,11%
2	11/06/2020	2,99%	15,93%	4,52%	3,83%	1,84%	19,22%	9,95%	0,00%	18,91%	22,82%
3	25/06/2020	2,54%	19,79%	3,58%	0,87%	1,03%	22,26%	17,81%	4,69%	12,00%	15,42%
4	09/07/2020	6,33%	24,32%	10,02%	2,55%	4,85%	7,81%	4,44%	0,82%	13,06%	25,80%
5	23/07/2020	1,71%	20,56%	9,45%	3,01%	3,19%	0,00%	24,10%	3,01%	16,95%	18,02%
6	06/08/2020	2,66%	8,35%	9,99%	2,56%	8,81%	29,35%	34,02%	1,13%	3,13%	0,00%
7	27/08/2020	2,68%	19,89%	9,90%	3,61%	2,96%	2,68%	25,07%	0,56%	17,02%	15,63%
8	03/09/2020	6,49%	23,53%	11,97%	3,96%	5,38%	20,99%	12,27%	0,81%	4,87%	9,74%
9	10/09/2020	8,23%	31,45%	19,64%	4,56%	6,05%	17,56%	0,00%	2,28%	10,22%	0,00%
10	02/10/2020	3,63%	13,15%	6,00%	2,20%	2,81%	16,34%	24,70%	0,55%	5,89%	24,75%
11	08/10/2020	4,68%	16,22%	7,06%	3,88%	3,18%	0,00%	37,31%	2,39%	14,43%	10,85%
12	22/10/2020	3,98%	30,57%	9,08%	3,98%	1,59%	10,03%	0,00%	0,00%	40,76%	0,00%
13	29/10/2020	3,97%	21,73%	8,06%	2,92%	4,79%	2,34%	31,54%	1,40%	23,25%	0,00%
14	04/11/2020	2,85%	19,16%	14,48%	2,51%	4,45%	5,25%	0,00%	1,14%	27,82%	22,35%
15	16/11/2020	2,99%	19,98%	14,21%	6,52%	4,70%	7,26%	11,65%	2,56%	30,13%	0,00%
16	25/11/2020	7,33%	21,17%	16,67%	3,50%	8,67%	33,17%	0,00%	4,00%	5,50%	0,00%
17	28/11/2020	2,71%	23,03%	5,91%	3,08%	3,82%	0,00%	28,57%	0,74%	19,58%	12,56%
18	02/12/2020	8,02%	18,29%	15,72%	2,06%	5,04%	12,85%	31,96%	1,03%	2,26%	2,77%
19	08/12/2020	3,19%	25,18%	7,99%	2,95%	5,04%	16,58%	0,00%	5,16%	27,52%	6,39%
20	12/12/2020	6,28%	17,69%	21,16%	3,14%	9,42%	23,80%	0,00%	2,98%	15,54%	0,00%
21	16/12/2020	8,84%	17,08%	15,61%	2,95%	6,92%	30,93%	9,28%	3,39%	5,01%	0,00%
22	21/12/2020	4,42%	14,97%	11,53%	3,68%	3,56%	41,72%	6,38%	0,98%	12,76%	0,00%
23	22/12/2020	9,09%	20,64%	26,78%	3,69%	7,86%	10,81%	0,00%	2,70%	18,43%	0,00%
24	09/01/2021	10,27%	33,08%	26,62%	3,80%	9,89%	0,00%	0,00%	3,42%	12,93%	0,00%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 23 - Composição gravimétrica dos rejeitos Renascer.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagem de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
1	11/03/2020	5,72%	6,93%	6,93%	1,32%	3,79%	18,97%	10,17%	4,40%	4,55%	37,23%
2	03/06/2020	2,68%	8,50%	7,79%	12,20%	4,80%	8,97%	0,00%	5,74%	27,62%	21,72%
3	10/06/2020	4,83%	16,61%	7,18%	2,12%	2,24%	19,43%	0,00%	5,77%	7,42%	34,39%
4	24/06/2020	2,69%	12,90%	8,13%	2,76%	4,57%	35,08%	1,14%	1,81%	11,09%	19,83%
5	22/07/2020	2,73%	7,34%	8,20%	1,72%	4,71%	6,78%	0,00%	2,38%	7,49%	58,63%
6	19/08/2020	8,74%	26,02%	19,22%	5,44%	5,44%	25,44%	0,00%	9,71%	0,00%	0,00%
7	26/08/2020	6,18%	16,10%	21,11%	2,99%	6,08%	35,29%	0,00%	2,56%	9,70%	0,00%
8	02/09/2020	5,03%	14,57%	7,84%	1,55%	5,55%	47,93%	9,10%	3,92%	4,51%	0,00%
9	09/09/2020	7,11%	10,34%	12,21%	2,82%	7,92%	47,38%	0,00%	4,56%	7,65%	0,00%
10	16/09/2020	4,14%	7,85%	10,87%	2,73%	1,61%	21,88%	29,94%	3,37%	10,31%	7,29%
11	29/09/2020	3,79%	22,34%	12,70%	2,56%	4,15%	34,07%	2,44%	1,47%	11,97%	4,52%
12	21/10/2020	2,41%	13,37%	9,16%	5,28%	7,09%	50,87%	2,34%	3,07%	6,42%	0,00%
13	28/10/2020	5,54%	19,20%	12,89%	2,80%	6,87%	36,44%	7,85%	3,57%	4,84%	0,00%
14	05/11/2020	4,19%	21,29%	9,42%	4,19%	4,71%	42,41%	0,00%	1,48%	12,30%	0,00%
15	24/11/2020	7,44%	17,05%	13,26%	1,89%	9,07%	5,55%	33,42%	5,95%	6,36%	0,00%
16	27/11/2020	3,40%	14,69%	12,49%	2,94%	2,20%	28,47%	21,49%	4,41%	5,23%	4,68%
17	01/12/2020	5,04%	21,15%	10,64%	3,22%	6,86%	17,65%	15,13%	1,96%	14,15%	4,20%
18	03/12/2020	7,55%	15,11%	24,30%	7,22%	7,22%	8,21%	11,99%	1,81%	9,52%	7,06%
19	10/12/2020	6,77%	13,54%	13,54%	4,32%	2,77%	40,70%	4,65%	2,04%	7,67%	4,00%
20	17/12/2020	8,12%	16,35%	16,12%	5,53%	1,41%	16,35%	25,41%	1,41%	9,29%	0,00%
21	21/12/2020	7,00%	15,27%	21,60%	4,96%	5,74%	8,46%	31,91%	1,75%	3,31%	0,00%
22	22/12/2020	9,79%	14,61%	19,44%	4,56%	3,75%	29,49%	10,72%	3,08%	4,56%	0,00%
23	07/01/2021	4,41%	7,07%	4,57%	0,91%	6,48%	38,57%	1,66%	1,00%	9,23%	26,10%
24	08/01/2021	10,07%	16,89%	14,33%	4,78%	4,78%	36,52%	1,02%	1,02%	10,58%	0,00%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE B – Estatísticas descritivas das amostras de cada Associação de Catadores;

Tabela 24 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação Sul Recicla.

Sul recicla	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
N	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Média	4,94%	20,25%	12,13%	3,24%	4,88%	15,02%	13,03%	1,99%	15,05%	9,47%
Mediana	3,98%	19,93%	10,01%	3,11%	4,75%	14,59%	9,62%	1,74%	13,75%	4,58%
Moda	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	0,00	0,00	0,00	Múltipla	0,00
Frequência da Moda	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	2,00	1,00	11,00
Mínimo	1,71%	8,35%	3,58%	0,87%	1,03%	0,00%	0,00%	0,00%	2,26%	0,00%
Máximo	10,27%	33,08%	26,78%	6,52%	9,89%	41,72%	37,31%	5,16%	40,76%	40,11%
Quartil Inferior	2,82%	16,65%	7,52%	2,55%	3,07%	3,96%	0,00%	0,82%	5,69%	0,00%
Quartil Superior	6,91%	23,28%	15,67%	3,82%	6,49%	23,03%	24,88%	2,99%	19,25%	16,82%
Amplitude	8,55%	24,73%	23,20%	5,64%	8,85%	41,72%	37,31%	5,16%	38,50%	40,11%
Intervalo Interquartil	4,10%	6,63%	8,14%	1,26%	3,41%	19,07%	24,88%	2,18%	13,55%	16,82%
Variância	6,43%	36,44%	41,94%	1,15%	6,73%	146,71%	173,41%	2,11%	95,74%	129,64%
Desvio Padrão	2,54%	6,04%	6,48%	1,07%	2,59%	12,11%	13,17%	1,45%	9,78%	11,39%
Coefficiente de Variação	51,29%	29,81%	53,40%	33,08%	53,17%	80,65%	101,05%	72,97%	65,03%	120,27%
Erro Padrão	0,52	1,23	1,32	0,22	0,53	2,47	2,69	0,30	2,00	2,32
Assimetria	0,70	0,31	0,93	0,77	0,47	0,45	0,53	0,58	0,80	1,05
Erro Padrão da Assimetria	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Curtose	-0,87	0,38	0,30	3,21	-0,65	-0,69	-1,28	-0,53	0,56	0,48
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 25 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação ACMR.

ACMR	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
N	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Média	4,80%	19,94%	13,46%	3,34%	7,80%	19,12%	10,05%	3,21%	12,13%	6,14%
Mediana	4,87%	20,97%	12,58%	2,90%	7,46%	18,78%	3,21%	2,72%	9,68%	0,00%
Moda	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	0,00	Múltipla	Múltipla	0,00
Frequência da Moda	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,00	1,00	1,00	17,00
Mínimo	1,73%	6,33%	4,23%	0,00%	3,15%	1,49%	0,00%	1,30%	1,91%	0,00%
Máximo	9,15%	30,25%	25,38%	6,77%	15,97%	34,47%	56,63%	8,28%	40,06%	48,51%
Quartil Inferior	3,51%	16,87%	9,25%	1,91%	5,28%	13,61%	0,00%	2,01%	5,42%	0,00%
Quartil Superior	6,24%	23,68%	17,55%	4,98%	9,48%	24,17%	12,03%	3,54%	16,14%	3,44%
Amplitude	7,42%	23,92%	21,14%	6,77%	12,82%	32,98%	56,63%	6,98%	38,15%	48,51%
Intervalo Interquartil	2,73%	6,82%	8,30%	3,07%	4,19%	10,56%	12,03%	1,54%	10,72%	3,44%
Variância	3,55%	39,26%	32,31%	4,03%	11,95%	59,52%	239,12%	2,88%	80,24%	206,21%
Desvio Padrão	1,88%	6,27%	5,68%	2,01%	3,46%	7,72%	15,46%	1,70%	8,96%	14,36%
Coefficiente de Variação	39,23%	31,42%	42,22%	60,17%	44,33%	40,34%	153,90%	52,81%	73,82%	233,73%
Erro Padrão	0,38	1,28	1,16	0,41	0,71	1,57	3,16	0,35	1,83	2,93
Assimetria	0,25	-0,73	0,35	0,22	0,94	-0,12	1,90	1,54	1,48	2,47
Erro Padrão da Assimetria	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Curtose	-0,30	0,17	-0,57	-1,15	0,72	0,01	2,95	2,28	2,76	4,93
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 26 - Estatísticas descritivas dos rejeitos da Associação Renascer.

RENASCER	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Roupas e Calçados	Orgânico	Leitoso	Papel	Vidros e restos
N	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Média	5,64%	14,80%	12,67%	3,78%	4,99%	27,54%	9,18%	3,26%	8,57%	9,57%
Mediana	5,29%	14,90%	12,35%	2,96%	4,79%	28,98%	3,55%	2,82%	7,66%	2,00%
Moda	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	0,000000	Múltipla	Múltipla	0,000000
Frequência da Moda	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,00	1,00	12,00
Mínimo	2,41%	6,93%	4,57%	0,91%	1,41%	5,55%	0,00%	1,00%	0,00	0,00
Máximo	10,07%	26,02%	24,30%	12,20%	9,07%	50,87%	33,42%	9,71%	27,62%	58,63%
Quartil Inferior	3,96%	11,62%	8,17%	2,34%	3,77%	17,00%	0,00%	1,78%	5,03%	0,00%
Quartil Superior	7,28%	16,97%	15,23%	4,87%	6,67%	37,54%	13,56%	4,40%	10,44%	13,56%
Amplitude	7,66%	19,09%	19,73%	11,28%	7,65%	45,32%	33,42%	8,71%	27,62%	58,63%
Intervalo Interquartil	3,32%	5,35%	7,06%	2,53%	2,90%	20,54%	13,56%	2,63%	5,41%	13,56%
Variância	5,10%	25,84%	27,72%	5,70%	4,11%	199,53%	125,61%	4,22%	27,15%	240,61%
Desvio Padrão	2,26%	5,08%	5,26%	2,39%	2,03%	14,13%	11,21%	2,05%	5,21%	15,51%
Coefficiente de Variação	40,03%	34,36%	41,57%	63,10%	40,63%	51,29%	122,05%	63,01%	60,78%	162,11%
Erro Padrão	0,46	1,04	1,07	0,49	0,41	2,88	2,29	0,42	1,06	3,17
Assimetria	0,36	0,16	0,70	2,00	-0,06	-0,09	1,13	1,47	2,05	1,92
Erro Padrão da Assimetria	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Curtose	-0,77	-0,24	-0,32	5,85	-0,55	-1,19	-0,01	2,80	7,30	3,36
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 27 - Composição das amostras coletadas na ACMR.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagens de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Leitoso	Papel
1	10/03/2020	10,24%	26,95%	18,02%	3,85%	15,84%	8,31%	8,14%
2	12/06/2020	5,72%	40,05%	18,53%	3,23%	8,21%	4,98%	19,28%
3	23/06/2020	5,27%	45,47%	18,45%	1,81%	9,39%	6,10%	13,51%
4	28/07/2020	10,78%	35,09%	24,19%	4,51%	13,78%	3,13%	8,52%
5	05/08/2020	4,43%	23,43%	19,74%	7,20%	19,00%	2,77%	23,43%
6	18/08/2020	6,67%	25,44%	25,44%	5,99%	20,41%	3,67%	12,38%
7	25/08/2020	4,73%	34,80%	31,25%	6,93%	12,16%	2,70%	7,43%
8	15/09/2020	8,29%	22,84%	15,63%	5,05%	6,49%	7,33%	34,38%
9	01/10/2020	5,48%	32,74%	21,10%	5,21%	14,66%	9,73%	11,10%
10	07/10/2020	9,05%	26,45%	19,24%	7,21%	14,57%	2,97%	20,51%
11	23/10/2020	8,67%	29,57%	31,80%	5,91%	10,25%	4,60%	9,20%
12	26/10/2020	7,41%	24,77%	24,23%	4,34%	15,55%	9,22%	14,47%
13	30/10/2020	8,89%	25,03%	15,05%	8,34%	8,21%	7,66%	26,81%
14	06/11/2020	9,40%	29,75%	25,95%	4,03%	17,23%	5,15%	8,50%
15	18/11/2020	5,63%	34,27%	19,41%	7,67%	10,33%	5,01%	17,68%
16	23/11/2020	6,29%	26,70%	17,35%	2,72%	6,97%	7,82%	32,14%
17	26/11/2020	7,04%	22,69%	15,96%	3,13%	7,67%	1,56%	41,94%
18	30/11/2020	7,63%	33,33%	18,24%	6,47%	10,45%	4,48%	19,40%
19	09/12/2020	11,71%	31,64%	25,87%	6,82%	12,59%	6,82%	4,55%
20	11/12/2020	9,40%	41,16%	9,84%	3,36%	14,09%	6,04%	16,11%
21	15/12/2020	6,79%	30,58%	24,96%	7,68%	7,09%	3,40%	19,50%
22	21/12/2020	12,10%	41,81%	18,84%	3,68%	11,18%	5,36%	7,04%
23	22/12/2020	2,41%	31,55%	14,44%	0,00%	14,44%	2,67%	34,49%
24	05/01/2020	9,49%	30,93%	22,39%	3,23%	13,09%	3,23%	17,65%
Média		7,65%	31,13%	20,66%	4,93%	12,24%	5,20%	17,84%
Desvio Padrão		2,38%	6,19%	5,15%	2,08%	3,79%	2,23%	9,82%
Variância		0,06%	0,40%	0,28%	0,05%	0,15%	0,05%	1,01%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 28 – Composição das amostras coletadas na Associação Renascer.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagens de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Leitoso	Papel
1	11/03/2020	16,99%	20,60%	20,60%	3,91%	11,28%	13,08%	13,53%
2	03/06/2020	3,86%	12,26%	11,24%	17,59%	6,92%	8,29%	39,84%
3	10/06/2020	10,46%	35,97%	15,56%	4,59%	4,85%	12,50%	16,07%
4	24/06/2020	6,12%	29,36%	18,50%	6,27%	10,40%	4,13%	25,23%
5	22/07/2020	7,91%	21,23%	23,72%	4,98%	13,62%	6,88%	21,67%
6	19/08/2020	11,72%	34,90%	25,78%	7,29%	7,29%	13,02%	0,00%
7	26/08/2020	9,56%	24,88%	32,62%	4,61%	9,39%	3,95%	14,99%
8	02/09/2020	11,70%	33,91%	18,24%	3,61%	12,91%	9,12%	10,50%
9	09/09/2020	13,52%	19,64%	23,21%	5,36%	15,05%	8,67%	14,54%
10	16/09/2020	10,12%	19,21%	26,59%	6,69%	3,95%	8,23%	25,21%
11	29/09/2020	6,42%	37,89%	21,53%	4,35%	7,04%	2,48%	20,29%
12	21/10/2020	5,14%	28,57%	19,57%	11,29%	15,14%	6,57%	13,71%
13	28/10/2020	9,94%	34,47%	23,14%	5,03%	12,33%	6,42%	8,68%
14	05/11/2020	7,27%	36,97%	16,36%	7,27%	8,18%	2,58%	21,36%
15	24/11/2020	12,20%	27,94%	21,73%	3,10%	14,86%	9,76%	10,42%
16	27/11/2020	7,49%	32,39%	27,53%	6,48%	4,86%	9,72%	11,54%
17	01/12/2020	8,00%	33,56%	16,89%	5,11%	10,89%	3,11%	22,44%
18	03/12/2020	10,38%	20,77%	33,41%	9,93%	9,93%	2,48%	13,09%
19	10/12/2020	13,37%	26,73%	26,73%	8,53%	5,48%	4,03%	15,14%
20	17/12/2020	13,94%	28,08%	27,68%	9,49%	2,42%	2,42%	15,96%
21	21/12/2020	11,75%	25,61%	36,22%	8,32%	9,62%	2,94%	5,55%
22	22/12/2020	16,37%	24,44%	32,51%	7,62%	6,28%	5,16%	7,62%
23	07/01/2021	13,09%	20,99%	13,58%	2,72%	19,26%	2,96%	27,41%
24	08/01/2021	16,12%	27,05%	22,95%	7,65%	7,65%	1,64%	16,94%
	Média	10,56%	27,39%	23,16%	6,74%	9,57%	6,26%	16,32%
	Desvio Padrão	3,50%	6,57%	6,36%	3,14%	4,10%	3,56%	8,12%
	Variância	0,13%	0,45%	0,42%	0,10%	0,18%	0,13%	0,69%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE C – Composição gravimétrica das amostras de CDR das Associações estudadas.

Tabela 29 - Composição das amostras coletadas na Associação Sul Recicla.

Semana	Data	Embalagem metalizada	Embalagem Macarrão e Afins	Embalagens de bolo e afins	Dois materiais	Isopor	Leitoso	Papel
1	12/03/2020	10,43%	38,08%	19,21%	7,78%	4,80%	7,78%	11,92%
2	11/06/2020	6,22%	33,17%	9,41%	7,97%	3,83%	0,00%	39,39%
3	25/06/2020	5,71%	44,46%	8,04%	1,96%	2,32%	10,54%	26,96%
4	09/07/2020	10,21%	39,26%	16,18%	4,11%	7,82%	1,33%	21,09%
5	23/07/2020	2,96%	35,51%	16,33%	5,20%	5,51%	5,20%	29,29%
6	06/08/2020	7,27%	22,80%	27,27%	6,99%	24,06%	3,08%	8,53%
7	27/08/2020	4,74%	35,13%	17,48%	6,37%	5,23%	0,98%	30,07%
8	03/09/2020	11,39%	41,28%	21,00%	6,94%	9,43%	1,42%	8,54%
9	10/09/2020	9,99%	38,15%	23,83%	5,54%	7,34%	2,77%	12,39%
10	02/10/2020	10,61%	38,42%	17,52%	6,43%	8,20%	1,61%	17,20%
11	08/10/2020	9,02%	31,29%	13,63%	7,49%	6,14%	4,61%	27,83%
12	22/10/2020	4,42%	33,98%	10,09%	4,42%	1,77%	0,00%	45,31%
13	29/10/2020	6,01%	32,86%	12,19%	4,42%	7,24%	2,12%	35,16%
14	04/11/2020	3,94%	26,46%	20,00%	3,46%	6,14%	1,57%	38,43%
15	16/11/2020	3,69%	24,64%	17,52%	8,04%	5,80%	3,16%	37,15%
16	25/11/2020	10,97%	31,67%	24,94%	5,24%	12,97%	5,99%	8,23%
17	28/11/2020	4,60%	39,12%	10,04%	5,23%	6,49%	1,26%	33,26%
18	02/12/2020	15,29%	34,90%	30,00%	3,92%	9,61%	1,96%	4,31%
19	08/12/2020	4,15%	32,70%	10,37%	3,83%	6,54%	6,70%	35,73%
20	12/12/2020	8,24%	23,21%	27,77%	4,12%	12,36%	3,90%	20,39%
21	16/12/2020	14,78%	28,57%	26,11%	4,93%	11,58%	5,67%	8,37%
22	21/12/2020	8,51%	28,84%	22,22%	7,09%	6,86%	1,89%	24,59%
23	22/12/2020	10,19%	23,14%	30,03%	4,13%	8,82%	3,03%	20,66%
24	09/01/2021	10,27%	33,08%	26,62%	3,80%	9,89%	3,42%	12,93%
Média		8,07%	32,95%	19,07%	5,39%	7,95%	3,33%	23,24%
Desvio padrão		3,39%	5,86%	6,81%	1,62%	4,35%	2,52%	11,79%
Variância		0,12%	0,36%	0,48%	0,03%	0,20%	0,07%	1,45%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE D – Estatísticas descritivas das amostras de CDR.

Tabela 30 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na ACMR.

Parâmetros	Variáveis						
	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Leitoso	Papel
Média	7,69%	31,23%	20,73%	4,95%	12,30%	5,23%	17,87%
Mediana	7,52%	30,75%	19,57%	4,78%	12,37%	4,99%	16,88%
Moda	9,40	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla
Frequência da Moda	2	1	1	1	1	1	1
Desvio Padrão	2,48%	6,27%	5,24%	2,12%	3,94%	2,33%	10,00%
Variância	6,16%	39,33%	27,41%	4,48%	15,56%	5,43%	100,03%
Erro Padrão	0,51%	1,28%	1,07%	0,43%	0,81%	0,48%	2,04%
Assimetria	-0,025	0,63	0,33	-0,31	0,30	0,46	0,88
Erro Padrão da Assimetria	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Curtose	-0,48	-0,18	0,16	-0,36	-0,72	-0,80	0,08
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Mínimo	2,41%	22,69%	9,84%	0,00%	6,49%	1,56%	4,54%
Máximo	12,10%	45,47%	31,80%	8,34%	20,41%	9,73%	41,94%
Quartil Superior	9,40%	34,53%	24,60%	6,87%	14,61%	7,07%	21,97%
Quartil Inferior	5,68%	25,95%	17,79%	3,29%	8,80%	3,18%	9,05%
Amplitude	9,69%	22,78%	21,96%	8,34%	13,92%	8,16%	37,40%
Intervalo Interquartil	3,72%	8,59%	6,80%	3,58%	5,81%	3,90%	12,92%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 31 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na Sul Recicla.

Parâmetros	Variáveis						
	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Leitoso	Papel
Média	8,07%	32,95%	19,07%	5,39%	7,95%	3,33%	23,24%
Mediana	8,38%	33,13%	18,36%	5,22%	7,05%	2,90%	22,84%
Moda	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla
Frequência da Moda	1	1	1	1	1	1	1
Desvio Padrão	3,46%	5,99%	6,96%	1,66%	4,44%	2,58%	12,04%
Variância	11,98%	35,88%	48,42%	2,75%	19,75%	6,64%	145,02%
Erro Padrão	0,71%	1,22%	1,42%	0,34%	0,91%	0,53%	2,46%
Assimetria	0,35	-0,19	0,01	0,07	2,10	1,14	0,07
Erro Padrão da Assimetria	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Curtose	-0,61	-0,63	-1,22	-0,85	6,92	1,26	-1,24
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Mínimo	2,96%	22,80%	8,04%	1,96%	1,77%	0,00%	4,31%
Máximo	15,29%	44,46%	30,03%	8,04%	24,06%	10,54%	45,31%
Quartil Superior	10,35%	38,11%	25,52%	6,97%	9,52%	4,91%	34,21%
Quartil Inferior	4,67%	28,71%	12,91%	4,12%	5,65%	1,50%	12,16%
Amplitude	12,33%	21,67%	21,99%	6,07%	22,29%	10,54%	41,00%
Intervalo Interquartil	5,68%	9,41%	12,61%	2,85%	3,87%	3,41%	22,05%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 32 - Estatísticas descritivas das amostras coletadas na Renascer.

Parâmetros	Variáveis						
	Embalagem Metalizada	Embalagem de Macarrão e Afins	Embalagem de Bolo	Dois Materiais	Isopor	Leitoso	Papel
Média	10,56%	27,39%	23,16%	6,74%	9,57%	6,26%	16,32%
Mediana	10,42%	27,49%	23,05%	6,37%	9,51%	5,79%	15,06%
Moda	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla	Múltipla
Frequência da Moda	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Desvio Padrão	3,57%	6,71%	6,50%	3,21%	4,18%	3,64%	8,29%
Variância	12,77%	45,09%	42,21%	10,31%	17,50%	13,22%	68,77%
Erro Padrão	0,73%	1,37%	1,33%	0,66%	0,85%	0,74%	1,69%
Assimetria	0,03	-0,24	0,24	1,75	0,40	0,55	0,75
Erro Padrão da Assimetria	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Curtose	-0,67	-0,56	-0,46	4,63	-0,29	-0,89	1,74
Erro Padrão da Curtose	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Mínimo	3,86%	12,26%	11,24%	2,72%	2,42%	1,64%	0,00%
Máximo	16,99%	37,89%	36,22%	17,59%	19,26%	13,08%	39,84%
Quartil Superior	13,23%	33,73%	27,13%	7,99%	12,62%	8,90%	21,52%
Quartil Inferior	7,70%	21,11%	18,37%	4,60%	6,60%	2,95%	11,02%
Amplitude	13,13%	25,63%	24,98%	14,88%	16,84%	11,44%	39,84%
Intervalo Interquartil	5,53%	12,62%	8,76%	3,38%	6,02%	5,95%	10,50%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).