

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Joana Zanette Crema

Título: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL PARA A INDÚSTRIA
CIMENTEIRA

Araranguá
2022

Joana Zanette Crema

Título: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL PARA A INDÚSTRIA
CIMENTEIRA

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Virmond

Araranguá

2022

Joana Zanette Crema

Título: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL PARA A INDÚSTRIA CIMENTEIRA

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Elaine Virmond, Dra.
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Silvia Layara Floriani Andersen, Dra.
Avaliadora
Universidade Federal da Paraíba

Profa. Elise Sommer Watzko, Dra.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.



Documento assinado digitalmente
Katia Cilene Rodrigues Madruga
Data: 22/12/2022 17:24:49-0300
CPF: ***.612.180-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profa. Kátia Madruga, Dra.
Coordenadora do Curso



Documento assinado digitalmente
Elaine Virmond
Data: 22/12/2022 17:45:08-0300
CPF: ***.166.759-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profa. Elaine Virmond, Dra.
Orientadora



Documento assinado digitalmente
Joana Zanette Crema
Data: 22/12/2022 17:08:04-0300
CPF: ***.791.319-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Joana Zanette Crema
Autora

Araranguá, 22 de dezembro de 2022.

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

Crema, Joana Zanette
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL PARA A
INDÚSTRIA CIMENTEIRA / Joana Zanette Crema ; orientadora,
Elaine Virmond, 2022.
50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Recuperação Energética. 3.
Coprocessoamento. 4. Combustíveis Alternativos. I. Virmond,
Elaine. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL PARA A INDÚSTRIA CIMENTEIRA

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF URBAN SOLID WASTE FOR THE DEVELOPMENT OF FUEL FOR THE CEMENT INDUSTRY

Joana Zanette Crema*

RESUMO

O desenvolvimento e a aplicação de tratamentos alternativos ao aterramento de resíduos sólidos urbanos (RSU) de forma integrada aos demais níveis da hierarquia de gestão de resíduos sólidos (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, aterrar) gera benefícios sociais, econômicos e ambientais. A utilização de combustíveis derivados de RSU é uma opção para reduzir a quantidade de resíduos destinada a aterro sanitário e oferecer tratamento alternativo com foco no aproveitamento de frações não recicláveis, ou com processo de reciclagem ainda não disponível ou acessível atualmente (rejeitos), aliado à recuperação energética. Neste contexto analisou-se físico-quimicamente os rejeitos resultantes da triagem de resíduos sólidos urbanos de um município ao Sul do Brasil para produção de CDR (combustível derivado de resíduos), com foco na aplicação para indústria de cimento. A utilização do CDR como alternativa aos combustíveis fósseis para produção de energia térmica na fabricação de cimento, é considerada uma atividade ambientalmente adequada, podendo ser considerada uma etapa entre a reciclagem e a recuperação de resíduos. No presente estudo, as amostras de rejeitos coletadas foram classificadas em diferentes tipos de frações, analisadas gravimetricamente e caracterizadas em laboratório para análises elementar, imediata, de metais e de poder calorífico. Como resultado, obteve-se um combustível possível de ser utilizado em fornos de cimenteiras, com alto poder calorífico (PCS: 29,30 MJ/kg; PCI: 28,31 MJ/kg), baixo teor de umidade (7,33%), baixo teor de cloro (0,147%) e baixo teor de cinzas (4,687%), onde os parâmetros descritos foram apresentados em base seca. Para tanto, espera-se que a utilização deste combustível contribua para a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera, além de solucionar a crise sanitária, que assola o nosso planeta, destinando os resíduos de forma mais nobre e ainda gerando valor na cadeia.

Palavras-chave: recuperação energética; coprocessamento; combustíveis alternativos.

ABSTRACT

The development and application of alternative treatments for landfilling urban solid waste (MSW) in an integrated manner with the other levels of the solid waste management hierarchy (reduce, reuse, recycle, recover, landfill) generates social, economic and environmental benefits. The use of fuels derived from MSW is an option to reduce the amount of waste destined for landfills and offer alternative treatment focused on the use of non-recyclable fractions, or with a recycling process that is not yet available or currently accessible (waste), combined with the energy recovery. In this context, the tailings resulting from the sorting of urban solid waste from a municipality in the south of Brazil were physical-chemically analyzed for the production of RDF (fuel derived from waste), with a focus on application to the cement industry. The use of RDF as an alternative to fossil fuels for the production of thermal energy in the manufacture of cement is considered an environmentally appropriate activity, and can be considered a step between recycling and waste recovery. In the present study, the waste samples

* Graduanda – Engenharia de Energia. Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail:
joanaazanette@hotmail.com

collected were classified into different types of fractions, analyzed gravimetrically and characterized in the laboratory for elemental, immediate, metals and calorific value analyses. As a result, a fuel that could be used in cement kilns was obtained, with high calorific value (PCS: 29.30 MJ/kg; PCI: 28.31 MJ/kg), low moisture content (7.33%), low chlorine content (0.147%) and low ash content (4.687%), where the described parameters were presented on a dry basis. Therefore, it is expected that the use of this fuel will contribute to the reduction of polluting gas emissions into the atmosphere, in addition to solving the health crisis that plagues our planet, disposing of waste in a more noble way and even generating value in the chain.

Key words: energy recovery; co-processing; alternative fuels.

1 INTRODUÇÃO

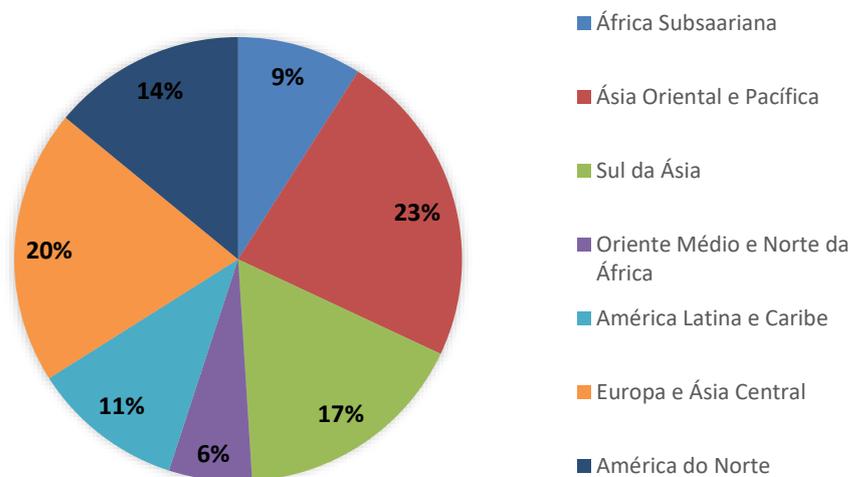
Um problema muito grande relacionado ao saneamento básico é a geração desenfreada de resíduos sólidos urbanos (RSU) e sua disposição inadequada no meio ambiente. O crescimento acelerado da geração de RSU se deve principalmente ao aumento da população e ao consumo de produtos industrializados, integrados aos novos hábitos culturais e alimentares da sociedade moderna. Por outro lado, a crescente demanda por energia tem promovido a busca por fontes alternativas e renováveis de energia, sendo possível recuperar energia de RSU e combustíveis derivados desses.

1.1 PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O mundo gera cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente, sendo que, em média, 33% desses resíduos não são gerenciados de maneira ambientalmente adequada. Olhando para o futuro, estima-se que a geração global de resíduos cresça para 3,40 bilhões de toneladas até 2050, o que representa mais do que o dobro do crescimento populacional esperado para o mesmo período (GROUP, 2022).

A região do Leste Asiático e Pacífico está gerando a maior parte dos resíduos do mundo (23%), ao passo que a região do Oriente Médio e Norte da África é a que menos produz em termos absolutos, com 6% (Figura 1). No entanto, as regiões de crescimento mais rápido são a África Subsaariana, o Sul da Ásia, o Oriente Médio e o Norte da África, onde, até 2050, a geração total de resíduos nessas regiões poderá triplicar. Além disso, mais da metade dos resíduos atualmente são despejados a céu aberto, e as trajetórias de crescimento de resíduos terão vastas implicações para o meio ambiente e sociedade como um todo, exigindo, portanto, ação urgente (KAZA *et. al.*, 2018).

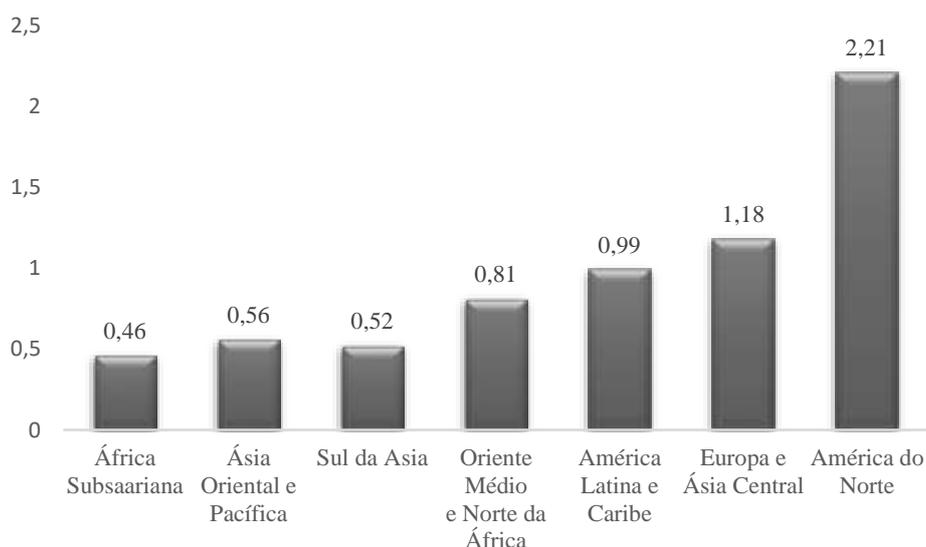
Figura 1 - Geração de resíduos por região em 2018



Fonte: Adaptado de Kaza *et. al.* (2018).

A geração de resíduos está intrinsecamente ligada à urbanização. Países e economias de alta renda são mais urbanizadas e geram mais resíduos *per capita* e no total. A nível regional, a América do Norte – que possui a maior taxa de urbanização (82%) – gera 2,21 quilogramas *per capita* por dia, enquanto a África Subsaariana gera 0,46 quilogramas *per capita* por dia a uma taxa de urbanização de 38% (Figura 2). A título de comparação, registre-se que o globo como um todo possui uma taxa média global de geração de resíduos de 0,74 quilogramas *per capita* por dia (KAZA *et. al.*, 2018).

Figura 2 - Geração média de resíduos por região do globo (kg/hab.dia) em 2018



Fonte: Adaptado de Kaza *et. al.* (2018).

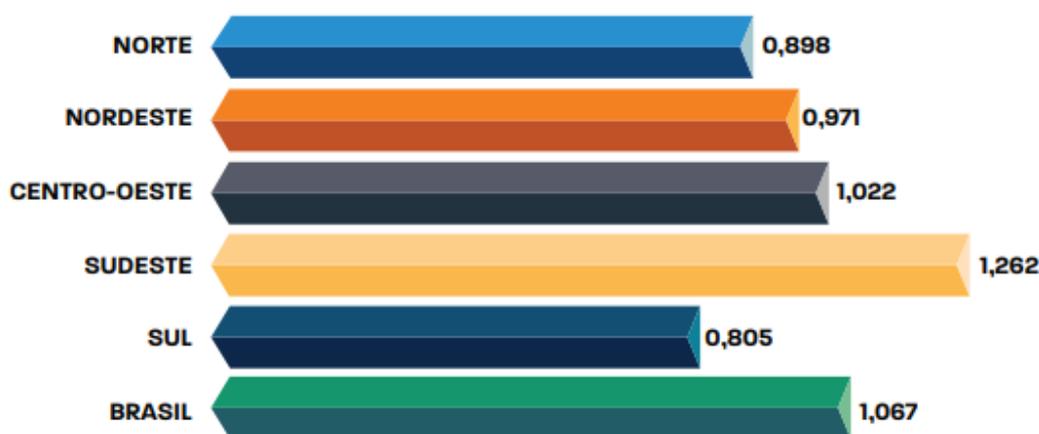
A América Latina possui em torno de 600 milhões de habitantes e sua geração *per capita* de resíduos está na faixa de 0,99 quilogramas por dia, o que a mantém próxima do padrão das regiões do Oriente Médio e Norte da África, e da Europa e Ásia Central. A região da América

Latina e Caribe, possui a maior taxa de crescimento urbano do mundo e já abriga algumas megacidades (população superior a 10 milhões), como Cidade do México, São Paulo, Buenos Aires e Rio de Janeiro (HETTIARACHCHI *et. al.*, 2018).

Essa tendência de urbanização repercute em uma maior geração de resíduos, sendo que a infraestrutura e saneamento básico não conseguem acompanhar este crescimento na mesma proporção. Deste modo, muitas áreas acabam por não receber atendimentos de serviços sanitários e coleta de RSU, dando margem a outros problemas de cunho ambiental e social. Além disso, questões econômicas, como planejamento financeiro deficiente e sistemas de cobrança ineficazes, também podem prejudicar a sustentabilidade dos serviços de saneamento. Por isso, e por tantos outros motivos, o gerenciamento de RSU é complexo. As opções de tratamento/recuperação dependem não apenas do volume e tipo de resíduo, mas também das condições socioeconômicas da população e/ou região (HETTIARACHCHI *et. al.*, 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), a geração de RSU no Brasil, no ano de 2020, alcançou um total de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas, ou seja, cada brasileiro gerou, em média, 1,07 kg de resíduo por dia. A geração diária média per capita de RSU por região pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 - Geração de RSU no Brasil e suas regiões (kg/hab.dia) no ano de 2020



Fonte: ABRELPE (2021).

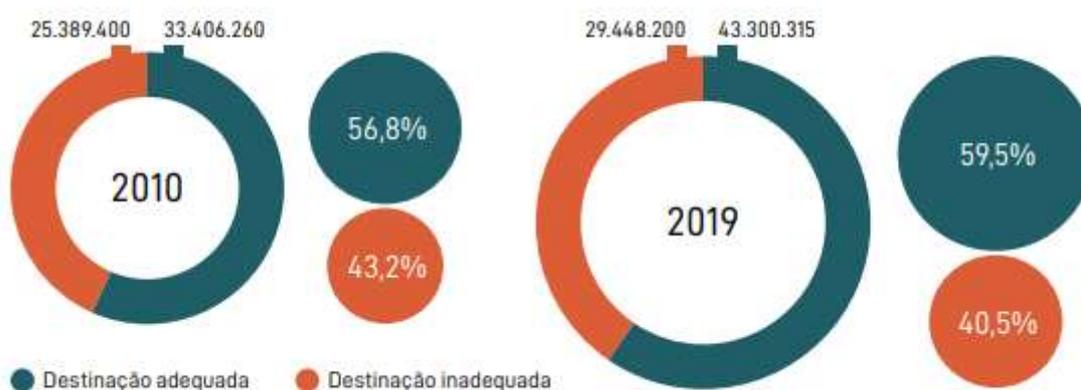
De fato, a cobertura de coleta de RSU ainda é insuficiente. Em 2020 foi de apenas 92,2% (média nacional), com algumas regiões com índice de cobertura de coleta superior à média nacional, (sudeste, sul e centro-oeste) e outras com aproximadamente apenas de 80% (norte e nordeste). O número de municípios que apresentaram alguma iniciativa de coleta seletiva registrado em 2020 foi de 4.145, representando 74,4% do total de municípios do país. O destaque foi para a região sul, que apresentou a menor taxa de geração de resíduos do país e o maior número de municípios com iniciativa de coleta seletiva (ABRELPE, 2021). Porém, as atividades de coleta seletiva em muitos desses municípios ainda não abrangem a totalidade da população, podendo ser apenas iniciativas pontuais.

Em 2018 apenas 3,9% dos RSU foram reciclados ou compostados no Brasil (ABRELPE, 2019), e grande parte dos RSU ainda são destinados de forma inadequada, causando inúmeros danos ao meio ambiente, à saúde da população e à sociedade. No Brasil, o déficit de saneamento básico continua extremamente elevado. Mais especificamente sobre os

resíduos sólidos, cerca de 3.000 municípios continuam dispondo RSU em locais inadequados. As áreas de disposição inadequada incluem lixões e aterros controlados, os quais receberam quase 40% do total de resíduos coletados em 2020. Na região Sul, 29,2% dos resíduos gerados foram destinados de forma inadequada, conforme previsto na Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010).

A disposição de RSU doméstico, comercial e industrial é um grande desafio a ser enfrentado, já que os aterros e lixões possuem taxas elevadas de emissão de gases poluentes para a atmosfera. Segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), após duas décadas de tramitação no Congresso Nacional e uma década de vigência da PNRS, a quantidade de RSU destinada de forma inadequada - lixões e aterros controlados - (que deveriam ter sido extintos em 2014), praticamente não se alterou em termos percentuais, conforme ilustrado na Figura 4 (ABREN, 2022).

Figura 4 - Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil em 2019 comparativamente a 2010 (t/ano)



Fonte: ABRELPE (2020).

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares (BRASIL, 2022), pretende-se eliminar completamente a disposição final de RSU em lixões e aterros controlados até o ano de 2024, gerando necessidade de novas destinações e/ou tratamentos para quase 100 mil t/d de RSU.

Com base na PNRS, somente rejeitos podem ser destinados aos aterros (resíduos inertizados/estabilizados):

XV - REJEITOS: 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 (Aterros);

VIII - DISPOSIÇÃO FINAL AMBIENTALMENTE ADEQUADA: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Além disso, os custos com transporte e disposição por tonelada de resíduos aumentaram gradativamente ao longo dos anos. Evidentemente, esse aumento causa elevação nas despesas de gerenciamento de RSU dos municípios.

Os custos com serviços públicos de limpeza urbana e manejo de RSU – que incluem a coleta, transporte, destinação final, serviços de varrição, entre outros – alcançaram cerca de R\$ 27,3 bilhões/ano em 2020, o que representa uma taxa de R\$10,75 por habitante ao mês. Essa

taxa foi apenas um pouco maior do que aquela aplicada em 2010, que foi de R\$8,00 por habitante ao mês para os R\$17,6 bilhões/ano aplicados. Logo, o aumento dos investimentos na gestão de RSU nos últimos dez anos foi pouco expressivo.

1.2 GESTÃO E TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS

A gestão de resíduos sólidos indica uma ordem de preferência de ações para reduzir e gerenciar os resíduos, chamado de hierarquia dos resíduos (Figura 5). Esse conceito foi definido pela PNRS e tem como objetivo tornar a gestão dos resíduos mais eficiente e criar novas oportunidades de negócios envolvendo a otimização do processo de tratamento dos resíduos (BRASIL, 2010). As etapas de não geração, redução, reutilização e reciclagem de materiais devem ter prioridade sobre a recuperação, ou tratamento, de resíduos para que apenas o resíduo recusado (rejeito) seja utilizado na etapa de tratamento térmico em sistemas *Waste-to-Energy* - WtE (PILISSÃO *et. al.*, 2021).

Figura 5 – Hierarquia da gestão de resíduos

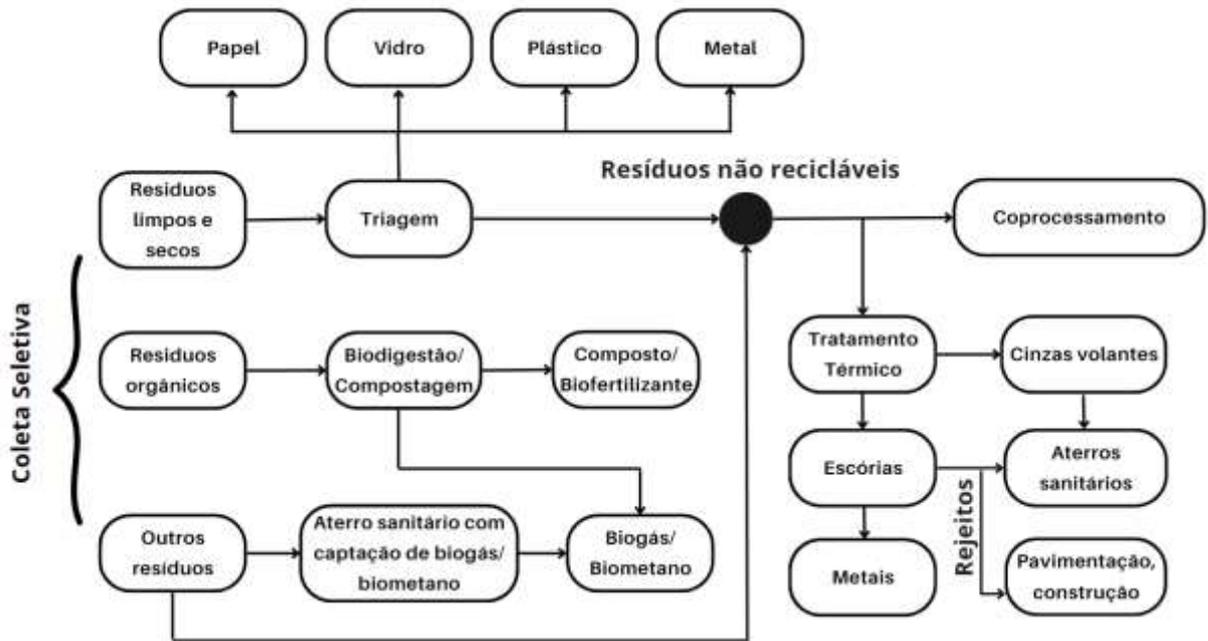


Fonte: Adaptado de Oliveira (2021).

A hierarquia da gestão de RSU adotada pela PNRS indica uma ordem de prioridade a ser seguida, e não uma obrigação, complementada por uma análise de impacto ambiental e de ciclo de vida. Os aterros utilizam-se de grandes áreas, contaminando solo e lençóis freáticos, já a compostagem requer tempo, terra e altos custos. A reutilização e a reciclagem também são limitadas a alguns tipos de resíduos, não resolvendo todo o problema do lixo. E a queima convencional de resíduos a céu aberto, causa grande poluição ambiental devido ao processo de combustão incompleta, liberando gases nocivos para atmosfera, além de desperdiçar a energia em forma de calor gerada na combustão, para o meio ambiente (SUKARNI, 2016).

Dentre as possíveis soluções para a recuperação de RSU se vislumbra a compostagem, biodigestão anaeróbica, tratamento térmico avançado (pirólise e gaseificação), biogás de aterro, incineração com recuperação energética, bem como a produção de CDR para coprocessamento (Figura 6).

Figura 6 – Fluxos de processos e principais subprodutos derivados de RSU



Fonte: Adaptado de ABREN (2022).

Segundo Pilissão *et. al.* (2021), uma vez produzido o CDR, ele poderá ser utilizado na produção de eletricidade (de forma isolada ou combinada com carvão ou gás natural em usinas termelétricas ou usinas de cogeração); como fonte de energia em processos industriais, como fornos de cimento e altos-fornos do setor siderúrgico; e também ser usado na constituição de novos materiais, por exemplo, na produção de asfalto ou materiais de construção (ERFO, 2022).

A escolha das tecnologias de tratamento desempenha um papel importante no cumprimento dos vários critérios de gestão de RSU, sendo em grande medida determinante para o sucesso ou fracasso do respectivo sistema de gestão (TISI, 2019). Nenhuma tecnologia de tratamento de resíduos se encaixa perfeitamente em todas as áreas e para todos os tipos de resíduos, portanto, deve-se realizar um estudo apurado dos materiais que compõem o resíduo, bem como suas características físico-químicas.

1.3 COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

No Brasil, o setor cimenteiro vendeu um total de 64,7 milhões de toneladas de cimento no ano de 2021, representando um aumento de 6,6% sobre o ano anterior. O destaque foi para a região Sul que obteve o maior crescimento, e onde se percebeu uma grande movimentação em construções de infraestrutura, principalmente em construções estaduais e pavimento urbano (ABCP, 2022).

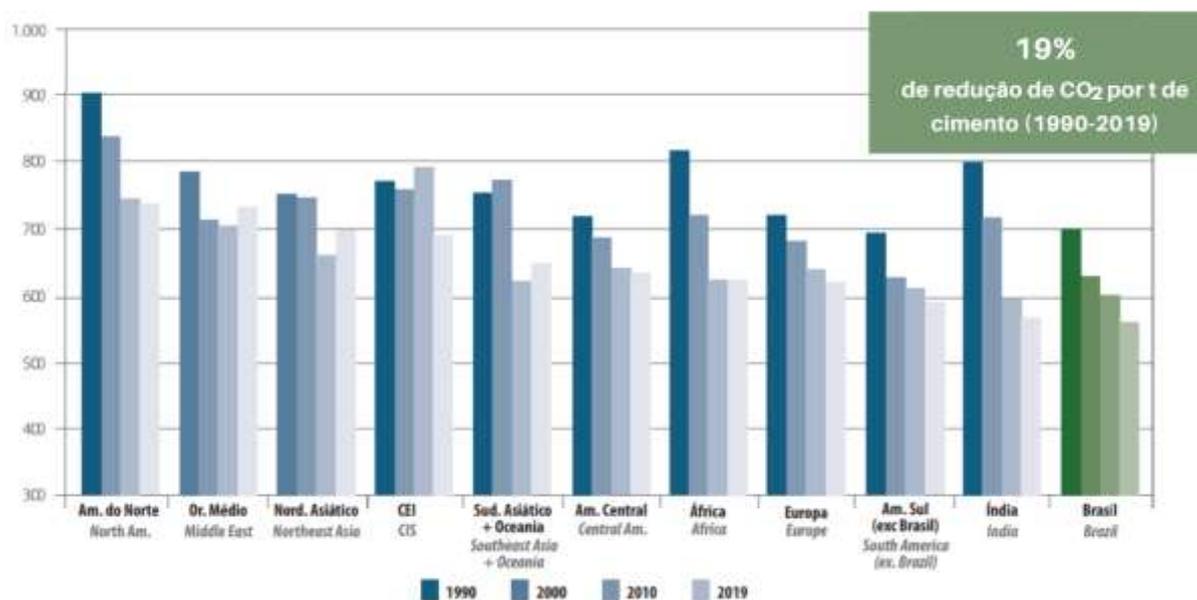
Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), no ano de 2021 o estado de Santa Catarina produziu 1.982.726 toneladas de cimento, e este número foi resultado da atuação de 5 grandes plantas de fabricação de cimento: Supremo Secil (Pomerode), Votorantim Cimentos (Vidal Ramos, Imbituba e Itajaí) e Pozosul (Capivari de Baixo) (SNIC, 2022).

O cimento é um produto resultante de uma atividade industrial integrada, proveniente da lavra e do beneficiamento de calcário e argila. A sua produção ocorre mediante moagem, homogeneização e produção da farinha (mistura crua), para posterior processamento físico-químico nos fornos de cimento (SNIC, 2022). Nos fornos, as matérias-primas são calcinadas para obtenção do clínquer, que depois de resfriado é incorporado a outras adições e moído, resultando assim no cimento.

A indústria cimenteira consome elevadas quantidades de energia e de recursos naturais, emite poeiras e outros poluentes, afeta vastas extensões de terreno durante a fase de exploração da matéria-prima e gera gases do efeito estufa. Esta atividade é responsável por cerca de 12% a 15% da energia total utilizada em todo o setor industrial mundial (MADLOOL *et. al.*, 2011), e por 8% do dióxido de carbono (CO₂) emitido globalmente (PROAÑO *et. al.*, 2020).

Conforme a Confederação Nacional da Indústria (2021), as cimenteiras brasileiras emitem a menor quantidade de gases de efeito estufa por tonelada de cimento. Enquanto a média mundial de emissão específica em 2019 foi cerca de 634 quilos de CO₂ equivalente por tonelada de cimento, no Brasil esse valor foi de 564 quilos por tonelada de cimento (Figura 7).

Figura 7 - Emissão específica de CO₂ por tonelada de cimento (kg CO₂/t cimento)



Fonte: Adaptado de Relatório anual SNIC (2020).

O esforço de redução das emissões no setor se deve principalmente a três fatores: i) uso de matérias-primas alternativas ao clínquer – chamadas de adições, como escórias siderúrgicas, cinzas de termoeletricas e pó de calcário; ii) uso de combustíveis alternativos, como biomassas e resíduos; e iii) medidas de eficiência energética, ao investir em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e elétrico. Essas medidas foram responsáveis pela redução de 19% na intensidade de carbono do setor de 1990 a 2019, enquanto a produção de cimento cresceu cerca de 220% (SNIC, 2020).

Uma alternativa amplamente difundida e reconhecidamente adequada, é o coprocessamento de resíduos em fornos da indústria de cimento, que promove a destruição térmica de resíduos urbanos e industriais. Esses resíduos são aproveitados em forma de combustível e matéria-prima para produção de cimento, sem afetar a qualidade do mesmo. Além de solucionar o problema da destinação inadequada de resíduos, permite a substituição de recursos naturais minerais e combustíveis fósseis como carvão mineral, óleo combustível e gás natural (SNIC, 2022).

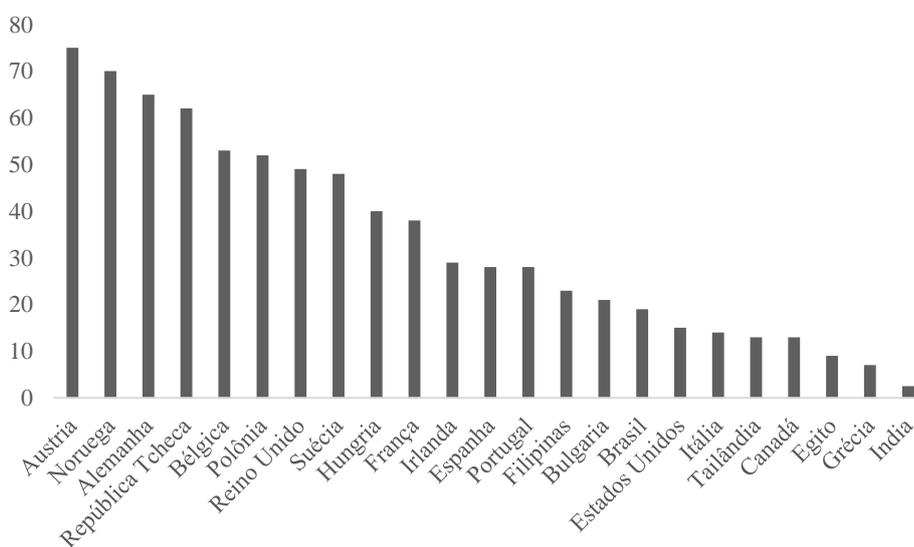
Existem diversos resíduos que podem ser incorporados aos fornos clínquer para produção de cimento, desde pneus até resíduos de usinas eólicas. Segundo a Associação Empresarial Eólica, as pás de aerogeradores, que encerram seu tempo de vida útil, podem ser utilizadas no processo de coprocessamento para fabricação de cimento. Inclusive, esta atividade já é realidade na Alemanha, mais precisamente na indústria Holcim Lägerdorf (AEE, 2021).

Os fornos de cimento reúnem as condições adequadas e necessárias para a destruição total de resíduos por meio do coprocessamento, quais sejam: altas temperaturas e longo tempo de residência, alta turbulência dos gases, ambiente alcalino e oxidante, bem como estabilidade térmica. O coprocessamento de CDR em fornos de cimenteiras contribui para a preservação de recursos naturais, redução de emissões de gases do efeito estufa e diminuição do passivo ambiental.

Além dos benefícios ambientais, essa atividade também promove benefícios sociais e econômicos, seja na geração de empregos, erradicação da destinação inadequada de RSU e melhoria da saúde pública, seja na redução de custos com combustíveis convencionais no processo de fabricação do cimento.

Nesse contexto, vários países em todo o mundo estão utilizando combustíveis alternativos como forma de substituição aos combustíveis fósseis para energia térmica, conforme apresentado na figura 8, que mostra como maior contribuinte a Áustria, seguida pela Noruega. Os dados abaixo colacionados foram extraídos da obra de Saha e Kartensen (2019).

Figura 8 - Taxa média de substituição térmica resultante de biomassa, resíduos fósseis alternativos e resíduos mistos em diferentes países do mundo [%]



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No Brasil, o coprocessamento surgiu como uma estratégia para melhorar o desempenho econômico (menor consumo energético) da indústria cimenteira. Em resposta à crise desencadeada pela recessão da economia brasileira nos finais da década de 1980, o setor cimenteiro implementou estratégias para redução de custos na fabricação do cimento (ROCHA *et. al.*, 2011).

Nesse contexto, o coprocessamento de resíduos iniciou no princípio da década de 1990 nas regiões Sul e Sudeste. E devido à carência de profissionais treinados nesse setor, em 1995 vários jornais brasileiros publicaram artigos denunciando suspeitas de intoxicação e alergias de pele em trabalhadores das indústrias cimenteiras de Cantagalo, no Rio de Janeiro. Estudiosos correlacionaram esses problemas a várias situações de risco, como exposição a emissões de dioxinas e furanos, bem como a metais pesados (ROCHA *et. al.*, 2011).

A atividade passou então a ser regulamentada inicialmente pelos órgãos ambientais do RS, PR, SP e MG e, em âmbito nacional, pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA 264/99), atualmente (CONAMA 499/2020), e incorporada à PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Com unidades industriais distribuídas em 18 Estados da

Federação, o setor cimenteiro possui 57 plantas integradas que possuem fornos rotativos para a produção de clínquer, onde 38 são licenciados para o coprocessamento de resíduos (SNIC, 2022).

Segundo Panorama do Coprocessamento de resíduo da Associação Brasileira de Cimentos Portland – ABCP (2021), cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos são coprocessados anualmente em todo o território brasileiro, e isso representa uma parcela de 28% na matriz energética para produção de cimento. Ou seja, 72% da energia utilizada na produção de clínquer nas indústrias de cimento do Brasil provém de combustíveis fósseis, sendo o restante proveniente de resíduos alternativos (15%) e biomassas (13%) (ABCP, 2021). Para os próximos 10 anos, a indústria pretende atingir a marca de 4 milhões de toneladas ano.

Conforme figura 9, em 2020 o Brasil obteve um excelente resultado, atingindo sua melhor marca desde o início da atividade: foram 2,018 milhões de toneladas de resíduos coprocessados (ABCP, 2021). Desde 1999 até 2020, 20,5 milhões de toneladas de resíduos foram coprocessados em fornos de cimento, o que significa dizer que deixaram de ser simplesmente destinadas ao aterro, convertendo-se em energia ou matéria-prima.

Figura 9 – Evolução do coprocessamento de RSU em fornos de cimento (1999-2020) em toneladas



Fonte: ABCP (2021).

Conforme projeções do Roadmap Tecnológico do Cimento (2019), estudo coordenado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e SNIC, com colaboração ativa da *International Finance Corporation (IFC)*, *International Energy Agency (IEA)* e *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* e academia, o setor passará a utilizar principalmente resíduos ligados diretamente ao saneamento básico, tais como RSU e dos lodos das estações de tratamento de efluentes. Esta iniciativa permitirá um alcance de substituição de combustível fóssil de 55% em 2050, mostrando o potencial de crescimento e a ambição do setor de médio a longo prazo – que almeja consolidar de fato a tecnologia no país e reduzir significativamente as emissões de CO₂.

As primeiras experiências com a utilização de CDR derivado de resíduos urbanos ocorreram em 2019 nos Estados de São Paulo e da Paraíba, com investimentos iniciais de aproximadamente R\$100 milhões. A propósito, no projeto da Paraíba um dos maiores benefícios ambientais, dentre tantos outros, foi justamente o encerramento de lixões de 18 municípios.

Conforme dados da ABCP (2019), o RSU certamente é o combustível alternativo mais promissor dentro da indústria a médio e longo prazo, e esse movimento será uma tendência para o setor cimenteiro, que vislumbra até 2030 chegar a coprocessar cerca de 2,5 Mt/ano apenas de CDR, equivalentes a 20% de sua matriz energética projetada.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO PARA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Diversos processos de pré-tratamento são necessários para transformar resíduos em combustível derivado de resíduos. O resíduo adequado para o coprocessamento depende das suas características e do tipo de indústria em que serão aplicados. A aplicação do CDR na indústria de cimento não deve interferir no funcionamento contínuo do forno, na qualidade do produto ou na performance da instalação, assegurando estabilidade na qualidade dos resíduos (GIZ, 2017).

Os níveis e as características das emissões dos poluentes atmosféricos dependem das características tecnológicas e operacionais do processo industrial, em especial, dos fornos rotativos de clínquer, da composição química e mineralógica dos insumos, e da composição físico-química dos combustíveis.

Segundo a NBR 10.004/2004, os resíduos são classificados de acordo com os riscos potenciais que os mesmos podem trazer para o meio ambiente e a saúde pública. Confira-se:

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 IIA – Não Inertes: Os resíduos classe IIA podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; Classe IIB – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, 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).

Os resíduos classificados como perigosos podem conter metais pesados, compostos organoclorados com cadeias vinílicas ou aromáticas, como as dioxinas e os furanos, todas elas substâncias tóxicas que devem ser evitadas.

Atualmente a literatura tem avançado muito para o conhecimento de processos envolvendo coprocessamento de resíduos, além do surgimento de diversas legislações que tornaram a utilização de CDR uma prática cada vez mais segura e ambientalmente adequada. Na tabela 1, tem-se os limites de emissões estabelecidos pela União Europeia (EC, 2006), EUA (U.S. EPA, 2011) e Brasil (CONAMA 316/2002).

Tabela 1 - Limite de emissões adotados pela União Europeia, EUA e Brasil

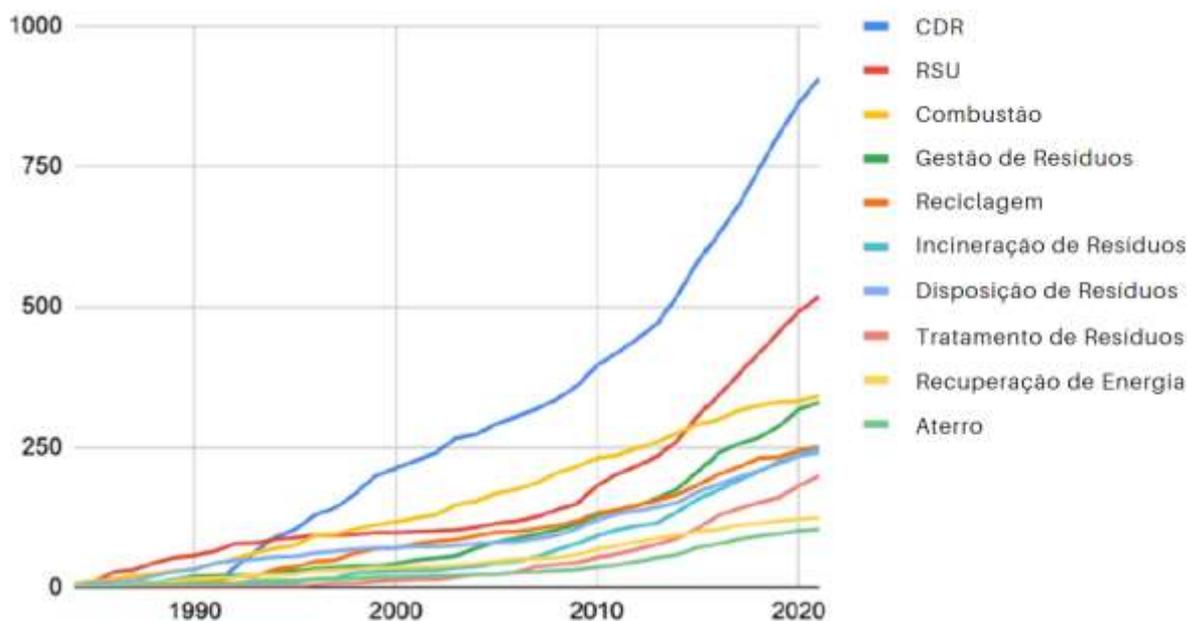
Tipo de poluente	Limite/UE ¹	Limite/Brasil ²	Limite/EUA ³
Dioxinas e furanos	0,1 ng/m ³	0,50 ng/Nm ³	0,13 ng/Nm ³
Material particulado	10 mg/m ³	70 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³
Substâncias orgânicas no estado de vapor e gás	10 mg/m ³		
Cloreto de hidrogênio (HCl)	10 mg/m ³	80 mg/Nm ³	29 mg/Nm ³
Ácido fluorídrico (HF)	1 mg/m ³	5 mg/Nm ³	
Dióxido de enxofre (SO ₂)	50 mg/m ³	280 mg/Nm ³	85 mg/Nm ³
Monóxido de nitrogênio (NO)			
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	200 mg/m ³	560 mg/Nm ³	305 mg/Nm ³

¹ Diretiva 2000/1976/CE; ² Limite de emissão de acordo com a resolução do CONAMA 316/2002; ³ 40 CFR 60.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Além disso, a revisão da literatura evidencia que o número total de artigos relacionados a CDR cresceu significativamente nos últimos dez anos, conforme mostrado na Figura 10. Os dados colacionados foram extraídos da obra de Shehata *et. al.* (2022), onde as metodologias empregadas para geração da figura foram análise bibliométrica e pacote R.

Figura 10 - O crescimento da literatura relacionada ao CDR de 1984 até 2020



Fonte: Adaptado de Shehata *et. al.* (2022).

De modo geral, as tecnologias de recuperação energética a partir de RSU, geram subprodutos/rejeitos como lixiviado, cinzas da caldeira, metais ferrosos e não ferrosos, resíduos do sistema de tratamento de gases de combustão, e emissões gasosas na atmosfera (ABRELPE, 2012). Portanto, há de se levar em conta a emissão de gases como CO₂, CO, NO_x, SO_x, compostos clorados e outros, os quais representam problema ambiental (GERA e GAUTAM,

1993). A presença de N, S e Cl na composição do CDR é o principal fator determinante das emissões dos respectivos poluentes.

Segundo Shumal *et.al.* (2020), um dos parâmetros mais importantes para produção de CDR é a quantidade de cloro no vapor, pois em grande quantidade pode aumentar o risco de entupimento dos equipamentos. Além disso, quando o teor de cloro é alto, o concreto acaba por enfraquecer, pois os compostos de cloro e as reações de álcali-sílica criam sais que geram microfissuras e diminuem a resistência à compressão (ECS, 2002).

A presença de cloro também gera emissões de HCl, sais de cloro e pode promover a formação de dioxinas e furanos. Em particular, quando o cloreto de polivinila (PVC) contido no RSU é queimado, pode ser emitido cloreto de hidrogênio e também dioxinas e furanos (PCDD/F). Ou seja, altos teores de cloro nos resíduos podem causar problemas operacionais, nesse sentido, resíduos de PVC não são adequados (GIZ, 2017).

Além disso, Shumal *et. al.* (2020) alega que a umidade é um fator importante na composição do CDR, pois sua presença em grande quantidade, no início do processo, poderá reduzir o poder calorífico do combustível. Outro parâmetro importante é a composição das cinzas, pois a mesma é misturada com o clínquer para produção de cimento, e se sua composição for muito diferente do comumente utilizado, afetará a qualidade do cimento.

Por outro lado, a presença da cinza do combustível alternativo poderia melhorar a resistência à compressão e acelerar as reações de hidratação do produto final. Isso é atribuído à semelhança dessa cinza com as composições das matérias-primas. Por exemplo, resíduos de borracha e plástico incluem os mesmos óxidos do cimento Portland (HASHEM *et. al.*, 2019).

O processo de produção do cimento envolve fluxos de gás, líquido e sólido com transferência de calor e massa, combustão, reações de compostos de clínquer e reações químicas indesejadas que incluem enxofre, cloro e álcalis. É importante entender esses processos para otimizar a operação do forno de cimento, diagnosticar problemas operacionais, aumentar a produção, melhorar o consumo de energia, diminuir as emissões e aumentar a vida útil da planta de produção (KARA *et. al.*, 2010).

Apesar da queima do CDR em fornos de cimento emitir poluentes atmosféricos, a quantidade gerada é ainda menor que as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis. Por esse motivo, o coprocessamento no processo de fabricação de cimento é considerado uma aplicação ambientalmente viável de seleção de recuperação, mais preferida do que o aterro e a incineração, conforme intitulado na “Convenção da Basileia” (UNEP, 2011)

Segundo Chyang *et. al.* (2010), o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) possui maior poder calorífico e melhor desempenho de combustão que o RSU bruto devido à uma série de processos de tratamento, como redução de tamanho, separação, secagem e densificação. O CDR tem como características poder calorífico considerável, composição físico-química homogênea, facilidade de armazenamento, facilidade de manuseio e transporte, e menor emissão de poluentes (GENDEBIEN *et. al.*, 2003; KOBAYASHI *et. al.*, 2005).

Foram investigadas as características de resíduos de diversos países, para produção de CDR em diferentes aplicações, e os resultados foram apresentados de forma conjunta na Tabela 2. Esse estudo amplo da literatura teve como objetivo comparar os parâmetros físicos e químicos encontrados em diversas obras, com os resultados da caracterização das amostras de rejeito de Imbituba/SC.

Tabela 2 – Características de CDR de diferentes países

Fonte	País	Composição	Frações utilizadas	Formato	PCI^a [MJ/kg, b.s. ^b]	Cinzas [% massa, b.s. ^b]	Cloro [% massa, b.s. ^b]	Umidade [% massa, c.r. ^c]
Chyang <i>et. al.</i> (2010)	Taiwan	RSU	Misto	Compactado (15 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento)	-	12,23	0,85	5,38
Berge <i>et. al.</i> (2011)	EUA	RSU	Papel, vidro, plástico, alimentos e metal	Particulado	16,50	28,40	-	6,30
Kara (2012)	Turquia	RSU	Orgânico e recicláveis (metal, papel, plástico, etc.)	Particulado	14,65	7,70	0,95	25,00
Komilis <i>et. al.</i> (2012)	Grécia	RSU	Orgânico (resíduos de papel, resíduos de alimentos, resíduos de quintal e plásticos)	Particulado (1,5 mm)	25,20	-	-	38,40
Kimambo e Subramanian (2014)	Índia	RSU + Biomassa	Papel, plásticos e têxteis + serragem, pó de coco, aguapé e casca de arroz	Compactado (briquete com aglutinante de amido de mandioca)	18,60-23,90	2,80-9,20	0,34-0,52	<10,00
Rahman <i>et. al.</i> (2014)	Austrália	RSU	Misto (removendo inertes, recicláveis e orgânicos)	Compactado (Pellet)	21,20	10,90	0,60	15,00
Gallardo <i>et. al.</i> (2014)	Espanha	RSU	Rejeitos da triagem (orgânico, papel, plástico, metal e elementos volumosos)	Particulado (1 mm)	20,60	10,69	0,34	34,46

Kerdsuwan <i>et. al.</i> (2015)	Tailândia	RSU	Seca (plástico, papel, tecido, borracha e vestígios de material não combustível)	Particulado	25,94	8,98	6,27	49,23
Sukarni (2016)	Indonésia	RSU	Orgânico e inorgânico	Compactado	25,78	5,25	0,48	4,69
Bessi <i>et. al.</i> (2016)	Itália	RSU	Rejeito de tratamento mecânico	Particulado (50 a 100 mm)	12,70-21,50	7,10-18,50	0,20-0,40	11,60-31,40
Brás <i>et. al.</i> (2017)	Portugal	RSU	Rejeito da coleta seletiva misto (em sua maioria papel, plástico e textil)	Compactado (pellet)	23,06	10,00	0,22	21,00
Ranieri <i>et. al.</i> (2017)	Itália	RSU	Rejeito de tratamento mecânico biológico	Particulado	13,83	-	0,06	29,02
Shumal <i>et. al.</i> (2020)	Irã	RSU	Rejeito de tratamento mecânico	Particulado	12,16	10,00	0,03-0,43	39,00
			Rejeito de Compostagem	Particulado	14,66	30,00	0,03-0,16	10,00
Piaia (2021)	Brasil	RSU	Embalagens metalizadas, plásticos, poliestireno expandido, papel e embalagens compostas por dois materiais	Compactado (blend)	22,73	3,79-4,35	1,81-2,44	14,33-45,99

^a Poder Calorífico Inferior; ^b Base seca; ^c Conforme recebida.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Berge *et. al.* (2011), em sua obra, abordou um processo de conversão térmica chamado carbonização hidrotermal, utilizando RSU que possui baixo teor de umidade (6,30%, c.r.) e elevado teor de cinza (28,4%, b.s.). Já em Sukarni (2016), a mistura orgânica-inorgânica de RSU, estudada como recurso energético, apontou baixo teor de cinzas (5,25%, b.s.) e de umidade (4,69%, c.r.), e ao mesmo tempo poder calorífico surpreendentemente comparável à classe média do carvão (25,78 MJ/kg, b.s.).

No estudo de Kerdsuwan *et. al.* (2015), foram analisadas as frações úmidas e secas de RSU separadamente para um sistema híbrido de gaseificação-incineração, onde a fração seca possui alto teor de cloro (6,27%, b.s.) e de umidade (49,23%, c.r.), mas poder calorífico elevado (25,94 MJ/kg, b.s.). Em contrapartida, Komilis *et. al.* (2012) utilizou a fração orgânica dos RSU para fins de análise de recuperação energética, e a mesma apresentou um poder calorífico elevado (25,20 MJ/kg, b.s.), e umidade menor que a apresentada por Kerdsuwan *et. al.* (2015)(38,40%, c.r.).

Em Piaia (2021), foram analisados os rejeitos da triagem de três diferentes centros de processamento de resíduos localizados ao sul do Brasil, para produção de CDR, em que estes formaram um *blend* compactado. Para os três centros, foi obtido uma média de 22,73 MJ/kg (b.s.) para poder calorífico e valores entre 3,79% (b.s.) e 4,35% (b.s.) para teor de cinzas.

Na obra de Kimambo e Subramanian (2014), o compactado foi produzido através de uma mistura de RSU, com serragem, pó de coco, aguapé e casca de arroz, com aglutinante de amido de mandioca. Nas análises físico-químicas encontrou-se umidade menor que 10% (c.r.), poder calorífico em uma faixa de 18,60 a 23,90 MJ/kg (b.s.) e teores de cloro entre 0,34%(b.s.) e 0,52%(b.s.). Já no estudo de Kara (2012), o CDR produzido foi misturado com coque de petróleo em diferentes proporções e seguido da caracterização do clínquer para produção de cimento. Sendo assim, as emissões de gases medidas em forno rotativo foram abaixo dos valores limite das diretivas que são aceitáveis na indústria de cimento, sendo teor de cloro abaixo de 1%(b.s.).

Rahman *et. al.* (2014), em seu estudo, avaliou diversos combustíveis alternativos para utilização em indústria de cimento, onde o RSU misto e compactado para formação de CDR apresentou teor de cloro de 0,60%(b.s.) e poder calorífico de 21,20 MJ/kg (b.s.). Na Espanha, Gallardo *et. al.* (2014) analisou os rejeitos da triagem de uma estação de tratamento mecânica-biológica que apresentaram um teor de cloro de 0,34%(b.s.) e alto teor de umidade (34,46%, c.r.) principalmente devido aos rejeitos de banheiro e aos resíduos orgânicos que chegam até a planta estudada.

Em Portugal, Brás *et. al.* (2017) encontrou teor de cloro de 0,22% (b.s.) para um compactado produzido a partir de rejeitos da coleta seletiva, que possuía em sua maioria papel, plástico e têxteis. O mesmo apresentou poder calorífico de 23,06 MJ/kg (b.s.).

Shumal *et. al.* (2020), em sua pesquisa, apresentou estudos comparativos entre rejeitos de estações de tratamento mecânico e de compostagem, onde as análises físicas e químicas apresentaram diferenças em diversos parâmetros. A análise de cinzas para ambas as rotas (tratamento mecânico: 10%, b.s.; compostagem: 30%, b.s.), apresentou composição compatível ao clínquer e, portanto, não haveria grande preocupação em utilizar o CDR nas plantas de cimento do Irã. O alto teor de umidade (tratamento mecânico: 39%, c.r.) dos rejeitos deve-se principalmente à grande quantidade de matéria orgânica na composição gravimétrica média dos rejeitos.

No estudo desenvolvido por Ranieri *et. al.* (2017), na região sul da Itália, o teor de umidade do CDR, produzido através de rejeitos de uma estação de tratamento mecânico biológica, alcançou o valor médio de 29,02% (c.r.). O mesmo possui teor de cloro igual a 0,06% (b.s.).

Já para Bessi *et. al.* (2016), a distribuição granulométrica das amostras apresentou-se homogênea, tendo em vista um maior controle na etapa de refino, que resultou em mais de 80% dos materiais apresentando granulometria entre 50 e 100 mm. Para este estudo, foram analisados diferentes fluxos de saída de uma estação de tratamento mecânico para produção de CDR, onde o poder calorífico oscilou em uma faixa de 12,70 a 21,50 MJ/kg (b.s.) e o teor de cloro ficou entre 0,20 e 0,40% (b.s.).

As questões mais preocupantes na combustão de CDR são as emissões de HCl e PCDD/Fs (dioxinas e furanos), devido aos componentes de cloro contidos no combustível. No estudo de Chyang *et. al.* (2010), o CDR produzido de RSU comum, foi utilizado na co-queima juntamente com carvão, em leito fluidizado, para observações de emissões de poluentes. Apesar do teor de cloro do CDR em 0,85% (b.s.), o estudo apresentou emissões consideráveis de dioxinas e furanos, mas a principal causa da sua formação foi devido à combustão incompleta. Nesse contexto, é possível dizer que a combustão completa – como é o caso do coprocessamento em fornos de cimento – seria uma alternativa preferida ao leito fluidizado.

Dada esta conjuntura, tem-se o objetivo geral deste trabalho como o estudo de rotas para recuperação energética de Resíduos Sólidos Urbanos, com ênfase na produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), a partir da caracterização físico-química de frações não recicláveis de RSU e visando à sua aplicação energética na indústria cimenteira. Para isso, realizou-se um estudo de caso do município de Imbituba/SC no âmbito do projeto de pesquisa atualmente em execução na UFSC intitulado “Desenvolvimento de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos e biomassa visando à recuperação energética” (SIGPEX n. 202003797), financiado pelo Edital Universal FAPESC 12/2020, em execução no período de 01/11/2021 a 31/10/2023.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- 1) Conhecer o modelo de gestão pública de RSU do município de Imbituba/SC, as práticas atuais de gerenciamento de RSU empregadas, a infraestrutura para a operação do serviço de coleta e transporte, tratamento e destinação final dada aos resíduos municipais.
- 2) Coletar amostras de rejeitos da triagem da coleta seletiva de resíduos do município.
- 3) Caracterizar físico-quimicamente as frações de RSU residuais visando à obtenção de combustível derivado de resíduo.
- 4) Analisar a produção de combustível derivado de resíduos com potencial de aplicação como fonte alternativa de energia no setor cimenteiro.

2 METODOLOGIA

Para o presente estudo foram consideradas as rotas para recuperação energética de rejeitos provenientes da etapa de triagem de materiais recicláveis que compõem o RSU, e realizou-se um estudo de caso para o município de Imbituba/SC. O foco foi a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) para aplicação energética na indústria cimenteira.

2.1 OBJETO DE ESTUDO

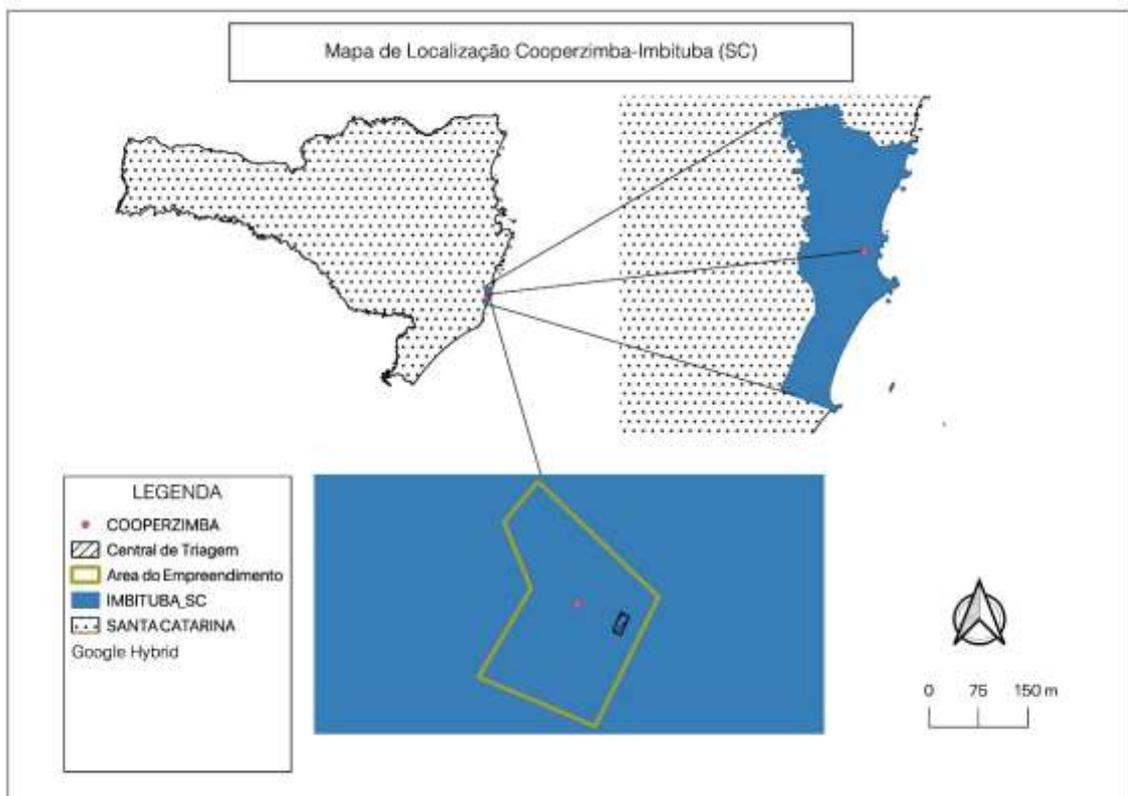
O município de Imbituba está localizado no litoral sul de Santa Catarina (SC), a 90 km da capital do estado, Florianópolis, entre as coordenadas latitude: 28°14'24" S e longitude 48°40'13" W. A cidade de Imbituba possui área de 184,79 km² e tem como municípios limítrofes: ao norte, Garopaba e Paulo Lopes; ao sul, Laguna; a oeste, Imaruí; a leste, o Oceano Atlântico. Apresenta uma população adjacente de 45.286 mil habitantes e pode ser visualizado na Figura 12 a seguir (IBGE, 2020).

Segundo diagnóstico realizado na base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para o município de Imbituba, no ano de 2018 foram coletadas

13.345,700 toneladas de resíduos sólidos domiciliares, sendo uma taxa de geração per capita diária de 0,82 kg/hab.dia. Desse total de material coletado 97% destes resíduos foram aterrados e apenas 2,014% são recicláveis recuperados. O custo anual do município com a gestão de RSU foi de R\$ 4.129,585,79 (SNIS, 2018).

A Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Material Reciclável – COOPERZIMBA, desenvolve atividades de reciclagem no centro de triagem de resíduos do município de Imbituba/SC, localizado no bairro de Vila Nova Alvorada (Figuras 11 e 12). A cooperativa opera a coleta seletiva de materiais recicláveis no município e conta, atualmente, com 27 associados e 9 empregados. Com três veículos de coleta, a cooperativa recolhe em média 110 toneladas de resíduos ao mês, sendo 20% rejeitos e o 80% material possível de ser reciclado (COOPERZIMBA, 2022).

Figura 11 - Mapa de localização da COOPERZIMBA em Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 12 - Área do empreendimento da COOPERZIMBA



Fonte: Google Earth (2022).

2.2 AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DE RSU

A composição do RSU é bastante heterogênea e apresenta variação significativa de um local para outro, haja vista a influência de fatores como clima e a cultura local (SOUTO e POVINELLI, 2013; GOUBEIA, 2012). Assim, para se ter bom entendimento quanto à qualidade do CDR a ser produzido é de suma importância o conhecimento da composição gravimétrica dos RSU, em especial da fração de interesse, neste caso, dos rejeitos da coleta seletiva do município de Imbituba/SC.

Um plano de amostragem deve ser estabelecido antes de se coletar qualquer amostra, e deve incluir: avaliação do local, forma de armazenamento, pontos de amostragem, tipos de amostradores, número de amostras a serem coletadas, seus volumes, seus tipos (simples ou compostos), número e tipo dos frascos de coleta, métodos de preservação e tempo de armazenagem, assim como os tipos de equipamentos de proteção a serem utilizados durante a coleta (ABNT, 2004, p. 2).

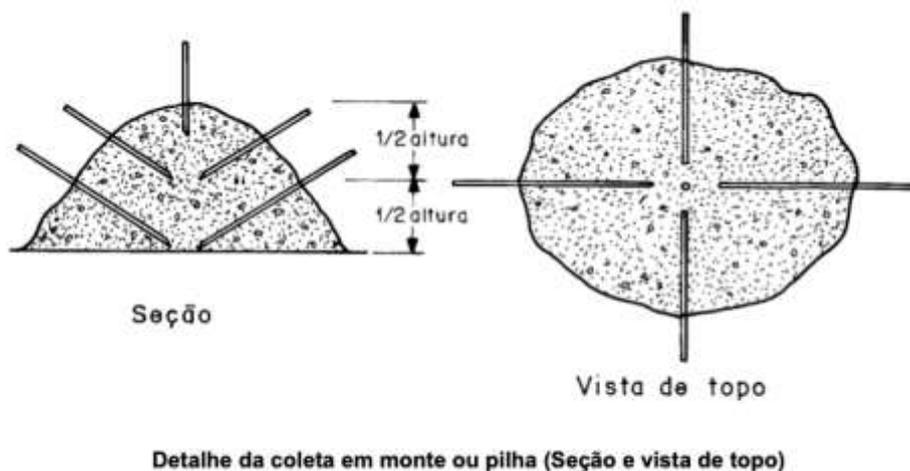
No trabalho de Machado (2022), as amostras de RSU foram coletadas em um centro de coleta, processamento e reciclagem de RSU do município de Imbituba/SC, resultantes da etapa de triagem de materiais recicláveis em períodos diferentes do ano, que ocorreram respectivamente nas datas 07/04/2021, 24/07/2021 e 06/11/2021. Os materiais da última coleta, foram utilizados no presente estudo para análises de potencial energético de CDR para aproveitamento em indústria de cimento.

Para a atividade de coleta foram utilizados alguns materiais: equipamentos de proteção individual (macacões impermeáveis, luvas, óculos de proteção e máscaras), quatro contentores de 240 L cada, lona plástica preta, balança, pás para manipulação do lixo, estufa com regulagem de temperatura, bandejas metálicas e grelha.

O método de quarteramento segundo a NBR 10.007.2004 consiste em um processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes (Figura 13).

As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado (ABNT, 2004).

Figura 13 - Amostragem de montes e pilhas



Fonte: ABNT (2004).

Adotou-se, então, a metodologia utilizada por Soares (2011), adaptando-se a parcela de quarteamento de duas, para uma parte amostrada. O ponto inicial da metodologia empregada em cada coleta foi escolher quatro pontos de amostragem de RSU, compostos pela retirada de tambores (240 L cada) de material (que seria destinado à área de rejeitos e encaminhado para aterro sanitário). Posteriormente, foi realizado o depósito do material amostrado sobre uma lona plástica, onde realizou-se o quarteamento (separação do material em quatro partes e escolha de uma delas). O total de RSU analisado foi de 960 L em volume (MACHADO, 2022).

Do processo de quarteamento restou cerca de 10 kg de RSU, com o qual fez-se novamente o espalhamento para serem separados nas seguintes frações:

- Matéria Orgânica (restos de alimentos e folhas de vegetais);
- Papel / Papelão;
- Plástico Duro (plásticos com maior resistência e densidade, tais como polietileno de alta densidade, garrafas PET, PVC, entre outros);
- Plástico Mole (plásticos com alta maleabilidade e baixa densidade, tais como polietileno de baixa densidade, polipropileno, entre outros);
- Poliestireno Expandido;
- Madeira;
- Trapos;
- Metais;
- Vidro;
- Outros.

Após as frações serem separadas, foram colocadas em sacos plásticos identificados e pesadas em balança de solo (Marca Exacta/ modelo KA-120).

A composição gravimétrica dos resíduos determina a porcentagem em massa de cada um dos componentes previamente listados na mistura, e seu cálculo foi feito empregando-se a seguinte Equação 1:

$$M = \left(\frac{mr}{ma} \right) \times 100 \quad (1)$$

sendo:

M = Material (%)

mr = Massa da fração do material (kg)

ma = Massa total da amostra (kg)

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Cada uma das frações foi devidamente preparada e foi submetida a ensaios para caracterização físico-química, que incluiu a determinação do teor de umidade, análises imediata e elementar, determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e análise de metais, conforme descrito a seguir.

2.3.1 Teor de umidade

Imediatamente após a pesagem de cada fração de RSU, realizou-se a determinação do teor de umidade das amostras empregando-se uma estufa laboratorial e os procedimentos descritos pela norma brasileira NBR 6457/86. As amostras foram mantidas em estufa laboratorial (Marca Solidsteel / Modelo SSDcr 480L) a uma temperatura de 105 °C. Após se observar a constância de massa das amostras, as mesmas foram retiradas da estufa e pesadas em balança eletrônica (Marca Exacta/ modelo KA-120, precisão de 0,001 kg). O tempo médio de secagem das amostras, para determinação da umidade, foi de 24 horas.

O teor de umidade foi calculado, em base úmida, por meio da Equação 2:

$$\%W_{búmida} = \frac{m_{bu} - m_f}{m_{bu}} \quad (2)$$

sendo:

$W_{búmida}$ = Teor de umidade em base úmida;

m_{bu} = Massa em base úmida;

m_f = Massa final (massa do resíduo seco em estufa a 105°C, até constância de massa).

2.3.2 Análises imediata e elementar

As amostras de cada uma das frações dos resíduos sólidos das biomassas foram separadas, preparadas e encaminhadas para caracterização pelos laboratórios da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina – SATC, instituição parceira do projeto de pesquisa que engloba este trabalho, localizada em Criciúma/SC. Foram realizadas as análises imediata e elementar das frações que compõem o rejeito de RSU, as quais são de extrema importância já que, dessas análises determina-se a qualidade das frações em termos de elementos constituintes dos materiais presentes no CDR, tais como carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O), enxofre (S) e cloro (Cl), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Metodologia para análises imediata e elementar

Metodologia	
<i>Análise Imediata</i>	
Umidade	PO-158/ ASTM D 7582-15/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Matéria volátil	PO-061/ ASTM D 3175/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Cinzas	PO-060/ ASTM D 3174/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Carbono fixo	PO-068/ ASTM D 3172/ PO-158/ ASTM D 7582 (TGA)
<i>Análise Elementar</i>	
Carbono (C)	PO-197/ PO-197
Hidrogênio (H)	PO-197
Nitrogênio (N)	PO-197/ PO-197
Enxofre (S)	ASTM D 4239/18 E ¹ Método A/ PO-064
Oxigênio (O)	por diferença
Cloretos (Cl)	ABNT NBR 9917:2009 / SMWW, 23ª Edição, Método 4500-Cl-B / PO-082

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A análise elementar e a determinação de poder calorífico das amostras de frações de plástico mole e poliestireno expandido não puderam ser realizadas devido às características das amostras que impossibilitaram a inserção da quantidade mínima de amostra necessária no compartimento de análise dos equipamentos. Sendo assim, algumas considerações precisaram ser feitas, para obtenção dos respectivos dados. Para análise elementar da fração de plástico mole, utilizou-se valores aproximados de plásticos como PEBD e PP, já para análise elementar do poliestireno expandido utilizou-se valores aproximados de PS, conforme Tabela 3. Os dados colecionados na Tabela 4 foram extraídos de Pessoa Filho (2020).

Tabela 4 - Análise elementar de alguns tipos de plásticos

	Carbono C [%, c.r.]	Hidrogênio H [%, c.r.]	Nitrogênio N [%, c.r.]	Enxofre S [%, c.r.]	Oxigênio O [%, c.r.]	Cloro Cl [%, c.r.]
<i>PEBD</i>						
Sharuddin et al. (2017)	85,60	13,40	0,26	0,00	0,74	0,00
<i>PP</i>						
Honus et al. (2016)	85,61	14,38	0,00	0,00	0,00	0,00
Chen et al. (2017)	85,71	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Sharuddin et al. (2017)	86,88	12,50	0,28	0,03	0,32	0,00
Mendonça et al. (2017)	84,10	14,57	0,19	0,09	1,20	0,00
<i>PS</i>						
Honus et al. (2016)	92,32	7,73	0,00	0,00	0,00	0,00
Sharuddin et al. (2017)	91,57	7,80	0,15	0,04	0,45	0,00
Mendonça et al. (2017)	91,60	8,21	0,19	0,09	0,19	0,00

c.r.: conforme recebida

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

2.3.3 Poder calorífico

O Poder Calorífico Superior (PCS) de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada por unidade de massa ou de volume na sua queima completa sendo os produtos da combustão resfriados até a temperatura inicial da mistura combustível (18 °C ou 25 °C). Ele inclui o calor liberado pela condensação de toda a quantidade de água presente nos produtos da combustão. Para se determinar o PCS das amostras das frações de RSU selecionadas, utilizou-se um calorímetro empregando-se o método PO-063 / ASTM D 5865-13.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) pode ser estimado a partir do PCS obtido experimentalmente deduzindo-se desse o calor latente de condensação de toda a água presente nos produtos da combustão, inclusive a água previamente presente no combustível como umidade. O PCI foi calculado pela equação de Dulong (Equação 3):

$$PCI = PCS - 2,43(9H + U) \quad (3)$$

onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior em MJ.kg⁻¹

PCS = Poder Calorífico Superior em MJ.kg⁻¹

H = fração mássica do hidrogênio na amostra determinada por meio de análise elementar;

U = teor de umidade da amostra, determinado na análise imediata em % em massa.

Pelo motivo citado anteriormente, as análises de poder calorífico para as amostras de plástico mole e poliestireno expandido não puderam ser realizadas e dados da literatura foram buscados. Para a fração de plástico mole utilizou-se a média dos valores do poder calorífico de plásticos como PEBD e PP, e para poliestireno expandido utilizou-se a média dos valores de todos apresentados por Pessoa Filho (2020), conforme consta na Tabela 5.

Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior de materiais plásticos

Tipo de Plástico	[kJ/kg, c.r.]	[MJ/kg, c.r.]
<i>PEBD</i>		
Sharuddin et al. (2017)	39.500	39,5
<i>PP</i>		
Costa (2006)	46.169	46,2
Chen et al. (2017)	45.340	45,3
Sharuddin et al. (2017)	40.800	40,8
<i>PS</i>		
Costa. (2006)	41.401	41,4
Sharuddin et al. (2017)	43.000	43,0

c.r.: conforme recebida

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

2.3.4 Análise de metais

As amostras das frações selecionadas de RSU foram digeridas empregando-se a norma ASTM D5258-02(2013) / SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248, que emprega extração ácida de elementos de sedimentos usando aquecimento por micro-ondas em recipiente fechado. A quantificação dos metais foi realizada por ICP-EOS (Espectrometria de emissão óptica com plasma). Os metais pesquisados foram: Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmi (Cd), Cálcio (Ca), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Selênio (Se), Zinco (Zn).

2.4 ANÁLISE DE APLICABILIDADE DO CDR NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Após a obtenção de todas as características físicas e químicas dos materiais, os resultados foram comparados com a legislação brasileira (NBR 16.849/2020) e europeia (UNE-EN 15359/2012), e também com os dados registrados na literatura. Além disso, tomou-se como

referência as especificações básicas para recebimento de CDR de uma indústria de cimentos nacional (Votorantin cimentos), fornecidos pela mesma à COOPERZIMBA, os quais constam na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais características físico-químicas do CDR admissível pela indústria de cimentos de referência

Tipo de CDR	Granulometria [mm]	PCI [MJ/kg]	Cinzas [%]	Umidade [%]	Cloro [%]
CDR 50	<50	> 18,84	< 12	< 18	< 0,3
CDR 25	<25	> 18,84	< 10	< 10	< 0,3

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Segundo as especificações básicas da Votorantim Cimentos para recebimento de CDR 50 ou 25, o CDR 50 é direcionado para a queima no precalcinador, que suporta a queima de resíduos com granulometria mais grosseira (até 50 mm). Já o CDR 25 é direcionado para a queima no queimador principal, o qual possui uma determinada restrição nas características físicas (partículas de até 25 mm) e químicas do resíduo.

Para recebimento de CDR 50 para a queima no pré-calcinador o PCI deve ser superior a 18,84 MJ/kg. Além disso, deve-se considerar limites máximos de cinzas de 12%, de umidade de 18%, e de cloro de 0,3%. Já para o recebimento de CDR 25 para a queima no queimador principal, o PCI do CDR 25 também deve ser superior a 18,84 MJ/kg, considerando limites máximos de cinzas e umidade de 10%, e cloro limitado a no máximo 0,30%.

O CDR é uma solução viável, quando permite uma redução de custos de uma usina com combustível e matéria-prima, ou seja, a decisão pelo investimento nesse processo varia com os preços do mercado de carvão mineral, gás natural e matéria-prima. Segundo Pereira (2021), o preço do coque de petróleo em 2018 no Brasil alcançou valores de R\$450/ton, sendo assim, para o CDR o preço equivalente energético do coque seria em torno de R\$140/ton.

Além disso, quando as distâncias são acima de 200 km a operação se torna financeiramente e ambientalmente desinteressante (GIZ, 2017).

Argumenta ainda, o supracitado, que:

Em geral, os custos de pré-processamento, produção de CDR e coprocessamento são influenciados por: Custos de planejamento e licenciamento do projeto; Capacidade das instalações para manuseio de resíduos, preparação e dosagem de resíduos ao forno de cimento; Medidas de saúde e segurança operacionais e controle de emissões; Custos de capital, impostos, seguros; Taxa de utilização da planta; Peças de reposição, materiais auxiliares e de manutenção; Análise laboratorial para determinar a composição dos resíduos e CDR; Administração, pessoal, salários (GIZ, 2017).

Na Tabela 7, têm-se as estimativas aproximadas de custo para investimento em uma planta de coprocessamento de cimento que operará através de CDR.

Tabela 7 - Estimativa de custo de uma planta de coprocessamento de cimento em países em desenvolvimento – os números são apenas uma orientação aproximada

Investimento Inicial	Custos de capital por ton & ano de entrada de resíduos	Custos de O&M por ton	Custo total por ton	Receitas ¹ por ton	Custo ² por entrada de ton de resíduos	Observação
5-25 mEUR incluindo pré-processamento	10-25 EUR/t	10-20 EUR/t	20-45 EUR/t	1-5 EUR/t	19-40 EUR/t	PCI 10 MJ/kg, pré-classificado e capacidade de 50.000 t/a, 20 anos de operação

¹ As receitas são na forma de substituição do combustível fóssil. Sem subsídios;

² Custos a serem cobertos pela taxa de embarque, subsídios etc.

Fonte: Adaptado de GIZ (2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ROTA PARA OBTENÇÃO DE CDR ATRAVÉS DO RSU DE IMBITUBA/SC

O total de resíduos produzidos pela cidade de Imbituba e demais dados de coleta foram obtidos a partir do SNIS, para o ano base de 2020 e estão apresentados na Tabela 8. Os resíduos recicláveis são enviados ao centro de triagem (COOPERZIMBA) e os rejeitos são encaminhados ao aterro da Pescaria Brava, localizado a 43 km de distância.

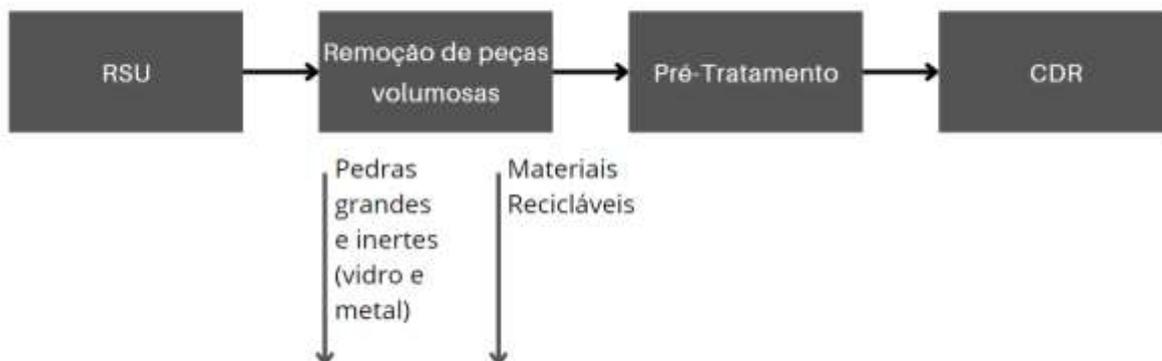
Tabela 8 – Dados de geração de resíduos da cidade de Imbituba/SC no ano de 2020

Diagnóstico Imbituba/SC - SNIS	Dados	Unidade
População atendida	45286	Habitantes
Geração de resíduos em 2020	21500700	kg
Taxa de geração per capita	1,3	kg/hab.dia
Recicláveis recuperados 2020	1350000	kg
Taxa de resíduos recicláveis recuperados	6,28	%
Taxa de resíduos aterrados	93,72	%
Taxa de resíduos recicláveis estimada	50	%

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Adotou-se, como rota para destino de rejeitos da triagem da coleta seletiva da cidade de Imbituba/SC, o fluxograma da Figura 14, onde o RSU, ao invés de ser destinado ao aterro, passa por diferentes processos de pré-tratamento (pré-processamento) sendo posteriormente transformado em combustível derivado de resíduos para ser utilizado em fornos de cimento. No estudo de Machado (2022), que foi complemento desta obra, acrescentou-se uma etapa de compactação e aglutinação no pré-tratamento, que não foi considerada no presente estudo. Como resultado, obteve-se então, somente os resíduos em forma particulada para serem inseridos diretamente nos fornos de cimento.

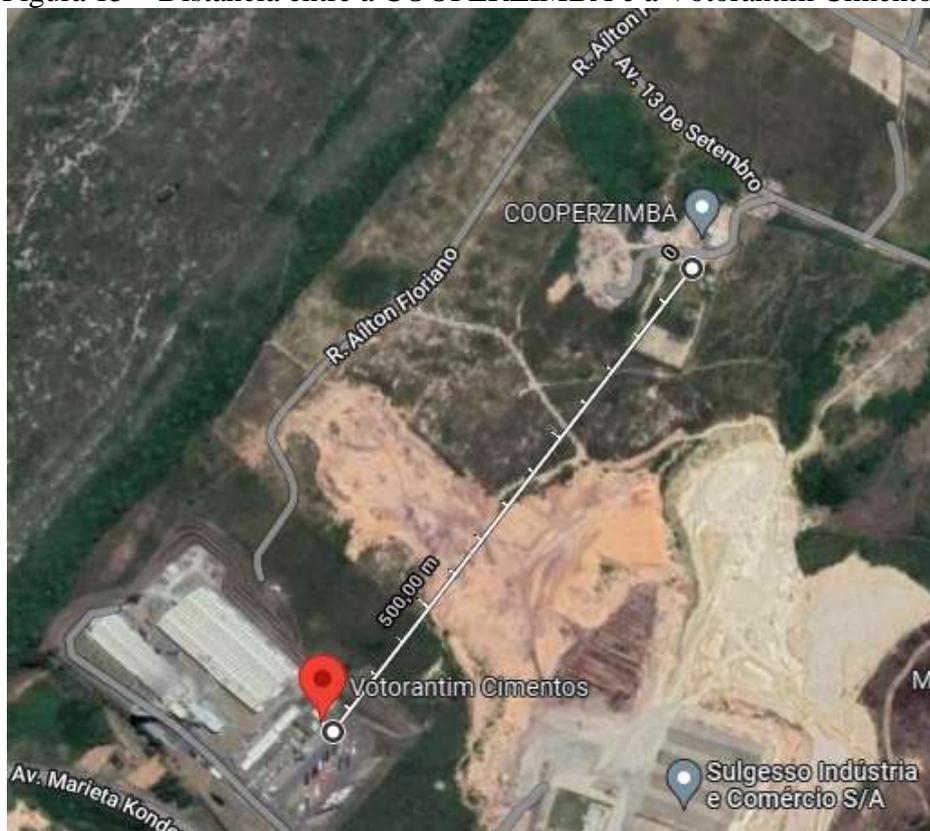
Figura 14 – Rota de fabricação de CDR a partir dos RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após produzido o CDR, o mesmo será transportado até a fábrica de cimento Votorantim localizada à aproximadamente 700 metros de distância da cooperativa de resíduos (COOPERZIMBA), conforme Figura 15. Contudo, os elevados custos de investimento para transporte e armazenamento do combustível, não serão necessários neste caso, o que torna o modelo de negócio para o projeto muito mais rentável.

Figura 15 – Distância entre a COOPERZIMBA e a Votorantim Cimentos



Fonte: Google Maps (2022).

3.2 AMOSTRAGEM E COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU DE IMBITUBA/SC

Em novembro de 2021 foi realizada a coleta das sobras de resíduos da triagem feita pela COOPERZIMBA. Essa parcela, denominada rejeito, não seria possível de ser reciclada, seja por motivos de não haver tecnologia na região para fazer a reciclagem, seja pela contaminação do material por restos de comida ou outro resíduo.

Na intenção de dar um destino mais nobre a este rejeito, coletou-se as amostras do material para análises físico-químicas, sobre justificativa de utilizá-las na produção de combustível derivado de resíduos, para utilização em fornos da Votorantim Cimentos. Portanto, para produção de CDR, o resíduo deveria não só possuir alto poder calorífico e baixo teor de umidade, como também baixo teor de cinzas e de cloretos, conforme especificações da cimenteira. Os resíduos foram coletados e amostrados conforme apresentado na Figura 16.

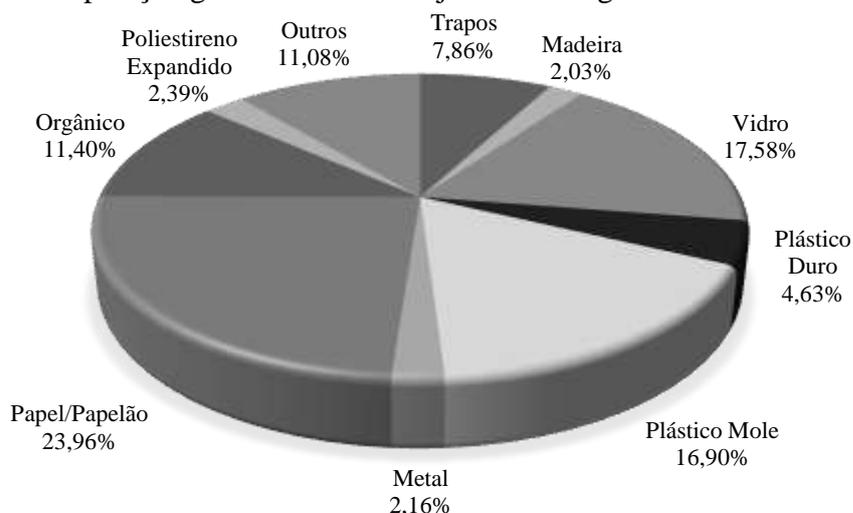
Figura 16 – Coleta de amostras de rejeitos da triagem de RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após coleta e amostragem, foi realizada a composição gravimétrica do rejeito, onde o mesmo foi separado e classificado em 10 frações conforme metodologia empregada, e representado graficamente na Figura 17. Contudo, através da análise da composição gravimétrica dos rejeitos da triagem da cooperativa de Imbituba/SC, foi possível afirmar que a maior representatividade estava concentrada nas frações de papel/papelão (23,96%), vidro (17,58%) e plástico mole (16,90%).

Figura 17 - Composição gravimétrica dos rejeitos da triagem de RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RSU DE IMBITUBA/SC

3.3.1 Teor de umidade das amostras coletadas

Na etapa seguinte, as amostras passaram por processo de secagem em estufa, onde pesou-se o material antes e depois da retirada de umidade, para se obter o teor de umidade. Conclui-se então, que parte significativa desta umidade estava concentrada nas frações de plástico mole (12,91%) e madeira (11,32%), conforme representado na Tabela 9.

Tabela 9 - Teor de umidade dos rejeitos da triagem de RSU de Imbituba/SC

	Massa inicial [kg]	Gravimetria [%]	Massa final [kg]	Teor de umidade [%]
<i>Biomassa</i>				
Trapos	0,822	7,86	0,778	5,35
Madeira	0,212	2,03	0,188	11,32
Vidro	1,838	17,58	1,82	0,98
Plástico duro	0,484	4,63	0,476	1,65
Plástico mole	1,766	16,90	1,538	12,91
Metal	0,226	2,16	0,224	0,88
Papel/papelão	2,504	23,96	2,386	4,71
Orgânico	1,192	11,40	1,12	6,04
Poliestireno expandido	0,25	2,39	0,226	9,60
Outros	1,1584	11,08	1,0904	5,87
<i>Total</i>	<i>10,4524</i>	<i>100</i>	<i>9,8464</i>	<i>5,80</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3.2 Análises imediata e elementar, poder calorífico e metais

Na Tabela 10 foram apresentados os resultados das análises imediata e elementar, poder calorífico e metais das frações analisadas. Os valores para RSU total são resultados de uma média ponderada dos valores relativos às frações selecionadas para composição do CDR.

Tabela 10 - Propriedades físico-químicas dos sólidos investigados: análises imediata, elementar, poder calorífico e metais das frações do rejeito de RSU de Imbituba/SC

Biomassa	Papel/papelão	Plástico mole	Plástico duro	Poliestireno expandido	Madeira	Orgânico	Trapos	Outros	RSU Total
<i>Análise imediata</i>									
CZ ^a [%, b.s. ^b]	5,7	1,76	1,51	0,61	14,97	7,61	3,8	67,62	13,48
MV ^c [%, b.s. ^b]	85,21	97,49	98,62	99,82	68,33	75,84	85,89	22,46	78,42
CF ^d [%, b.s. ^b]	9,09	0,75	N.D. ^h	N.D. ^h	16,7	16,55	10,31	9,92	8,12
U ^e [%, c.r. ^p]	8,54	3,31	0,83	1,91	8,37	15,67	4,88	8,96	7,56
<i>Análise elementar</i>									
C [%, b.s. ^b]	58,14	88,51 ^o	84,87	93,62 ^o	50,66	49,30	54,78	8,23	58,03
H [%, b.s. ^b]	8,93	14,30 ^o	11,32	8,07 ^o	6,09	8,48	6,77	2,56	8,87
N [%, b.s. ^b]	0,26	0,15 ^o	0,06	0,11 ^o	0,89	1,57	1,07	0,66	0,56
S [%, b.s. ^b]	0,15	0,02 ^o	0,22	0,04 ^o	0,06	0,16	0,16	0,09	0,12
O ^g [%, b.s. ^b]	23,96	0 ^o	2,69	0 ^o	33,92	24,80	32,33	79,49	26,20
Cl [%, b.s. ^b]	0,08	0,001 ^o	0,01	0,02 ^o	0,30	0,51	0,18	0,18	0,15
<i>Poder calorífico</i>									
PCS ^j [<i>MJ.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	21,35	44,44 ^o	44,47	43,04 ^o	23,88	21,74	22,73	25,38	28,76
PCI ^k [<i>MJ.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	20,43	43,09 ^o	43,42	42,28 ^o	23,23	20,77	22,06	25,05	27,86
<i>Metais</i>									
Alumínio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	210,22	494,88	38,25	< 0,1 ^k	385,56	99,05	271,77	1395,07	409,74
Antimônio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,005 ⁿ	2,12	< 0,005 ⁿ	< 0,005 ⁿ	1,58	< 0,005 ⁿ	2,41	< 0,005 ⁿ	0,69
Arsênio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	72,02	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	3,66	2,25
Bário [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,1 ^k	37,59	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	16,05	10,87	< 0,1 ^k	22,92	12,56
Cádmio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,001 ^m	< 0,001 ^m	2,77	< 0,001 ^m	0,24	< 0,001 ^m	0,16	0,28	0,23
Cálcio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	22777,66	750,77	813,91	1123,34	3809,03	5772,95	2393,26	17304,24	10773,07
Cobalto [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	11,78	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	1,58	0,50
Cobre [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	2,19	19,91	1,01	< 0,009 ^l	59,24	5,94	28,71	37,44	15,03
Cromo [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	1,11	< 0,01 ^f	83,11	< 0,01 ^f	128,71	9,51	16,23
Estanho [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k	< 0,1 ^k
Ferro [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	55,09	53,93	43,12	83,57	804,11	84,69	262,85	7108,27	1083,67
Manganês [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	5,43	1,79	1,83	< 0,1 ^k	56,17	91,67	11,70	116,58	34,09
Selênio [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	3,12	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	< 0,01 ^f	1,68	2,25	1,57	3,05	1,90
Zinco [<i>mg.kg⁻¹</i> , b.s. ^b]	79,00	35,69	8,12	115,12	44,38	94,44	38,48	194,63	80,68

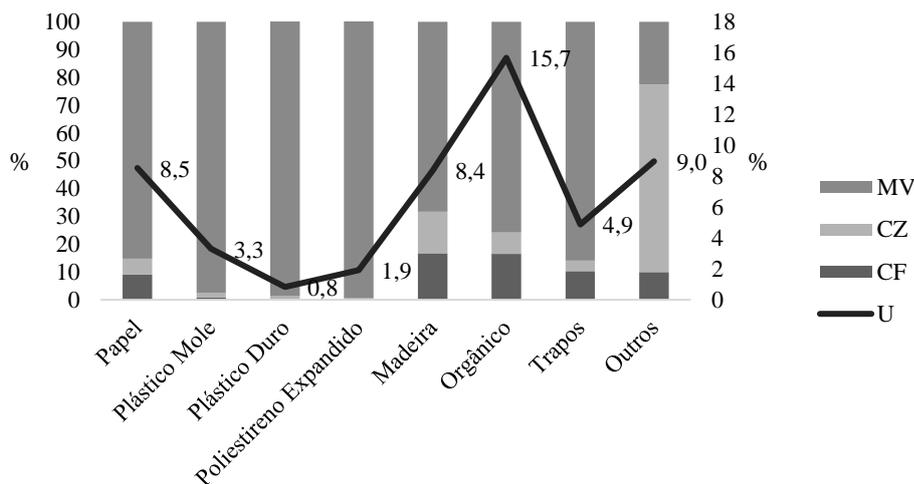
^a Cinzas; ^b Base seca; ^c Matéria volátil; ^d Carbono fixo; ^e Umidade; ^f Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,01%; ^g Valor obtido por diferença; ^h Não determinado; ⁱ Poder Calorífico Superior; ^j Poder Calorífico Inferior; ^k Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,1%; ^l Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,009%; ^m Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,001%; ⁿ Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,005%; ^o Média dos valores apresentados na obra de Pessoa Filho (2020); ^p conforme recebida.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3.2.1 Análise imediata

Para as comparações de análise imediata entre as frações, têm-se a representação gráfica da Figura 18, em que apresenta os resultados de Matérias Voláteis (MV), Teor de Cinzas (CZ), Carbono Fixo (CF) e Umidade de Higroscopia (U). Dito isso, observou-se que as frações com maiores teores de carbono fixo foram madeira e orgânico.

Figura 18 – Resultados da análise imediata das frações do rejeito de RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Com relação ao teor de voláteis, todas as frações obtiveram valores bem elevados, com exceção da fração “outros” (22,46%, b.s.), representada em grande parte por areia, terra e materiais não identificados. As matérias voláteis determinam maior facilidade de ignição e estabilidade da chama durante a combustão. No entanto, a taxa de desvolatilização também está relacionada à estrutura e decomposição das partículas de biomassa durante a combustão (VIRMOND *et. al.*, 2012). Apesar do baixo teor de voláteis para a fração “outros”, o valor resultante para a mistura de RSU se manteve em 78,42% (b.s.), devido aos valores altos de M.V. do poliestireno expandido (99,82%, b.s.), plástico duro (98,62%, b.s.) e plástico mole (97,49%, b.s.).

O teor de umidade para a mistura RSU ficou dentro dos valores estudados na literatura (4,69-49,23%, c.r.), estando em 7,56% (c.r.), o que representa um bom resultado por estar abaixo da média encontrada na literatura. Esse valor se deve principalmente à fração de orgânicos, que representou a maior taxa de umidade (15,67%, c.r.).

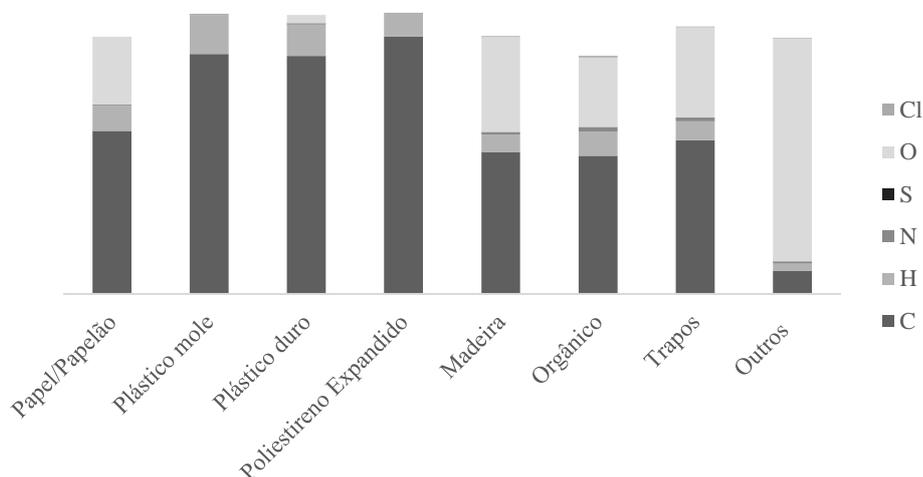
O teor de cinzas também se mostrou compatível com outros estudos realizados (2,80-30%, b.s.), resultando em 13,48% (b.s.) para a mistura de RSU, porém, este valor está acima do limite aceitável pela indústria cimenteira no Brasil (<12%). Este resultado é devido à participação da fração “outros”, que possui o maior teor de cinzas (67,62%, b.s.), na mistura.

3.3.2.2 Análise elementar

Pela análise elementar, pode-se verificar que C, H e O são os principais componentes do combustível produzido. Os elementos C e H contribuem positivamente para o PCS, enquanto o teor de H também afeta o PCI, devido à formação de água (VIRMOND *et. al.*, 2012). Contudo pode-se perceber um maior poder calorífico nas frações que apresentaram altos teores de C e

H, e baixos teores de O, foram elas plástico duro, plástico mole e poliestireno expandido, respectivamente.

Figura 19 - Resultados da análise elementar das frações do rejeito de RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Segundo Obernberger *et. al.* (2006), problemas de emissão relacionados a biocombustíveis sólidos podem ser esperados quando a concentração de N se apresenta acima de 0,6% em massa. As frações que apresentaram teores altos de nitrogênio foram orgânico (1,57%, b.s.) e trapos (1,07%, b.s.), porém, a mistura completa de RSU apresentou teor de 0,56% (b.s.), estando abaixo do valor limite.

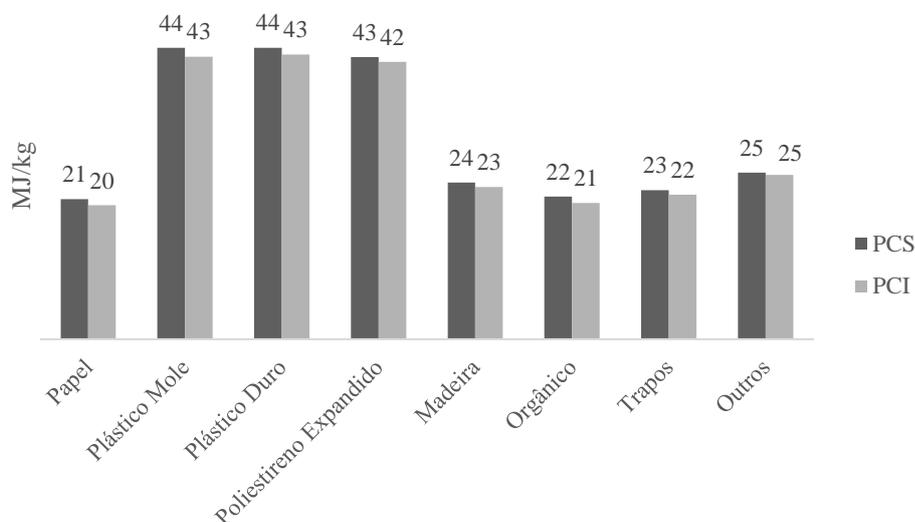
Os teores de enxofre no CDR comumente são inferiores aos valores de referência dos combustíveis fósseis convencionais (0,1-0,2% em CDR, 3-5% em combustíveis fósseis), conforme expresso por Genon e Brizio (2008). Nas frações dos resíduos de Imbituba/SC, não foram encontradas concentrações de enxofre superiores a 0,22% (b.s.), sendo que a mistura total de RSU apresentou concentração de 0,12% (b.s.).

Já para os teores de cloro, a utilização de CDR pode representar um aumento nas concentrações em relação aos combustíveis convencionais (0,3-0,5% em CDR e 0,1% em coque de petróleo), conforme dito também por Genon e Brizio (2008). Segundo Viczek *et. al.* (2020), os teores de cloro em RSU são provenientes principalmente dos plásticos, compósitos, combustíveis e resíduos alimentares. Surpreendentemente, as frações de plástico duro (0,01%, b.s.), plástico mole (0,001%, b.s.) e poliestireno expandido (0,02%, b.s.) apresentaram valores bem baixos para concentração de cloro. Nesse contexto, a maior concentração de cloro foi para a fração orgânica (0,51%, b.s.), e a mistura de RSU, por sua vez, apresentou apenas 0,15% (b.s.) desse componente, bem abaixo da média encontrada na literatura.

3.3.2.3 Análise de poder calorífico

Para uma análise comparativa entre o poder calorífico das frações presentes na amostra de rejeitos de Imbituba/SC, obteve-se o gráfico abaixo (Figura 19). Portanto, foram observados valores significativos para o poder calorífico nas frações de plástico mole e duro, bem como poliestireno expandido.

Figura 20 - Resultados de poder calorífico das frações do rejeito de RSU de Imbituba/SC



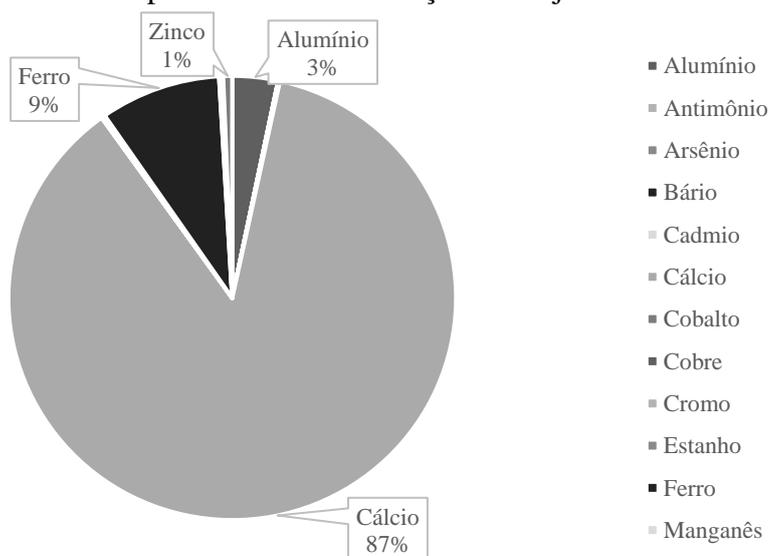
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para a amostra de RSU Total, foi possível obter PCS Total de 28,76 MJ/kg (b.s.) e um PCI total de 27,86 MJ/kg (b.s.). Estes valores estão acima do encontrado na literatura (PCI entre 12,16 e 25,94 MJ/kg, b.s.) e acima do valor do carvão mineral da região sul de Santa Catarina (PCS: 18,3 MJ/kg), conforme afirmado por Machado (2022).

3.3.2.4 Análise de metais

Com base nas análises de metais, foi possível perceber uma elevada concentração de cálcio (10773,07 mg/kg) na mistura total de RSU. Apesar de todas as frações apresentarem valores elevados para cálcio, a fração que melhor contribuiu para este valor foi papel/papelão (22777,66 mg/kg).

Figura 21 – Análise de metais para a mistura das frações do rejeito de RSU de Imbituba/SC



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Seguido do cálcio, os metais que apresentaram maior concentração na mistura de RSU foram ferro (1083,67 mg/kg), alumínio (409,74 mg/kg) e zinco (80,68 mg/kg), respectivamente.

Dos elementos químicos analisados, muitos são classificados como metais pesados, como por exemplo: arsênio, cádmio, cobre, estanho, antimônio, cromo, entre outros. Os metais pesados são considerados tóxicos devido à não degradabilidade e bioacumulação em organismos vivos (LABIDI *et. al.*, 2016). A quantidade de cobre encontrada na mistura de resíduos de Imbituba foi 15,03 mg/kg, valor abaixo do encontrado no estudo de Piaia (2021), em que se obteve 31,00 mg/kg.

Para cromo, o valor encontrado na mistura de RSU foi 16,23 mg/kg, enquanto no estudo de Shumal *et. al.* (2020) foi identificado um teor médio de cromo muito mais elevado (90,98 mg/kg). Normalmente este metal é encontrado em Têxteis, borrachas, sapatos, principalmente os artigos em couro, cujo processo de curtimento utiliza a aplicação de sais de cromo (VICZEK *et. al.*, 2020). Isso explica o fato da maior concentração de cromo nos resíduos de Imbituba ter sido encontrada na fração trapos (128,71 mg/kg).

No estudo de Piaia (2021) a média dos teores de zinco foi de 65,75 mg/kg, enquanto na mistura de RSU de Imbituba obteve-se teores de 80,68 mg/kg para zinco.

O cádmio em RSU pode ser proveniente de baterias e dispositivos eletrônicos, frações de PVC e pigmentos para polipropileno, polietileno e PET (VICZEK *et. al.*, 2020). No presente estudo foram encontrados 0,23 mg/kg de cádmio na mistura de RSU, que se deve principalmente à fração de plástico duro (2,77 mg/kg). No estudo de Piaia (2021) não foram detectados teores de cádmio, enquanto no estudo de Gallardo *et. al.* (2014) o cádmio atingiu valores de 9,80 mg/kg, ao passo que no de Bessi *et. al.* (2016), apresentou teores iguais a 1 mg/kg.

Segundo Götze *et. al.* (2016), a concentração de antimônio em resíduos mistos é de 62,90 mg/kg. Já para os resíduos de Imbituba este valor foi bem abaixo, estando em 0,69 mg/kg.

A concentração de arsênio na amostra de resíduo de Imbituba foi 2,25 mg/kg, que se deve principalmente à fração de madeira (72,02 mg/kg). Esse resultado corrobora com o estudo de Viczek *et. al.* (2020), que afirma que os altos níveis de arsênio no RSU estão relacionados à presença de madeira impregnada ou tratada com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) – substância utilizada para preservação da madeira.

A presença de cobalto na amostra de resíduos (0,50 mg/kg) também se deve à fração de madeira (11,78 mg/kg). Segundo Viczek *et. al.* (2020), o cobalto é usado para aplicações em madeira, como catalisador para certos polímeros e em várias baterias.

Para o estanho não houve presença significativa na amostra de resíduos mistos de Imbituba, pois o mesmo não foi quantificável, estando abaixo do limite inferior de quantificação igual a 0,1% para todas as frações. Para os demais metais, bário, manganês e selênio, obteve-se concentrações de 12,56 mg/kg, 34,09 mg/kg e 1,90 mg/kg, respectivamente.

3.4 VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO CDR NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Como resultado da produção de CDR a partir dos rejeitos da triagem da COOPERZIMBA, têm-se um combustível com as características apresentadas na Tabela 11. Os valores para os parâmetros apresentados se mostraram dentro da média encontrada na literatura para utilização de CDR em diversas aplicações, com exceção do poder calorífico que está acima da média encontrada em outros estudos.

Tabela 11 – Características da mistura de RSU de Imbituba/SC

PCS [MJ/kg, b.s.]	PCI [MJ/kg, b.s.]	U [%, c.r.]	CF [%, b.s.]	CZ [%, b.s.]	MV [%, b.s.]	Cl [%, b.s.]
28,758	27,860	7,559	8,120	13,481	78,418	0,152

b.s.: em base seca; c.r.: conforme recebida.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Conforme padrões de qualidade de CDR na Europa (UNE-EN 15359, 2012), apontados na obra de Gallardo *et. al.* (2020), o combustível proveniente dos resíduos de Imbituba se enquadrariam na classe 1 (Tabela 12). Vale destacar, contudo, que para o presente estudo a análise de mercúrio não foi realizada.

Tabela 12 – Parâmetros de qualidade para CDR na Europa

Parâmetro	Medida	Unidade	1	2	3	4	5
PCI	Média	MJ/kg (c.r.)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cl	Média	% (b.s.)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Hg	Mediana	mg/MJ (c.r.)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	Percentil de 80	mg/MJ (c.r.)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

c.r.: como recebido; b.s.: em base seca.

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

Além disso, para a norma brasileira (ABNT 16849/2020), o combustível se enquadrou em P1 para PCI e C1 para teores de cloro, conforme dados da tabela 13, extraídos da norma da ABNT de 2020 para limites de classificação de RSU para fins energéticos no Brasil.

Tabela 13 – Limites para classificação do RSU para fins energéticos no Brasil

Unidade	Medida estatística	Classes		
<i>PCI (base seca)</i>		P1	P2	P3
MJ/kg	Limite inferior da média (P ≥ 95%)	PCI ≥ 19,88	19,88 > PCI ≥ 14,98	14,98 > PCI ≥ 10
<i>Teor de cloro</i>		C1	C2	C3
%	Limite superior da média (P ≥ 95%)	Cl ≤ 0,5	0,5 < Cl ≤ 1,5	1,5 < Cl ≤ 3,0
<i>Teor de mercúrio</i>		H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	Hg P80 ≤ 0,2	0,2 < Hg P80 ≤ 0,5	0,5 < Hg P80 ≤ 1

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Segundo às especificações básicas da Votorantim Cimentos para recebimento de CDR 50 para a queima no pré-calcinador, o CDR estudado atende aos requisitos de PCI (27,86 MJ/kg, b.s.), umidade (7,559%, b.s.) e cloro (0,152%, b.s.), divergindo apenas no que diz respeito ao teor de cinzas (13,481%, b.s.) exigido pela cimenteira, estando assim em não conformidade. Para o recebimento de CDR 25 para a queima no queimador principal, o CDR analisado também atende aos requisitos de PCS, umidade e cloro, e diverge na questão do teor de cinza. Sendo

assim, o combustível foi considerado em não conformidade em ambas aplicações – CDR 50 ou CDR 25.

Na intenção de reduzir o teor de cinzas do CDR, foram refeitos os cálculos para a amostra de rejeitos removendo-se a fração “outros” pois a mesma possui elevado teor de cinzas. Como resultado foi possível obter um CDR com maior PCI (28,31 MJ/kg, b.s.), menor teor de cinzas (4,687%, b.s.), de umidade (7,332%, b.s.) e de cloro (0,147%, b.s.), estando assim em conformidade com as especificações da Votorantim Cimentos para recebimento de CDRU 50 e CDR 25. Esses resultados foram apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Características da mistura de RSU de Imbituba/SC, removendo-se a fração “outros”

PCS [MJ/kg, b.s.]	PCI [MJ/kg, b.s.]	U [%, c.r.]	CF [%, b.s.]	CZ [%, b.s.]	MV [%, b.s.]	Cl- [%, b.s.]
29,306	28,317	7,332	7,827	4,687	87,509	0,147

b.s.: em base seca; c.r.: conforme recebida.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No que tange a análise econômica da produção do CDR, não foram realizados cálculos de simulação de viabilidade, mas pode-se dizer que os custos para a produção são mínimos, visto que a matéria prima é RSU e que ela substitui o carvão, por vezes importado e de custo elevado. Além disso, a COOPERZIMBA – cooperativa de catadores, onde são realizadas as triagens dos resíduos da cidade de Imbituba/SC – fica localizada a menos de 1 km de distância da Votorantim Cimentos. Ou seja, a produção de CDR proveniente dos RSU de Imbituba/SC para utilização por essa indústria de cimento não demandaria custos significativos de transporte, armazenamento e logística. Sendo assim, os custos envolvidos nesse processo representariam basicamente o pré-tratamento (separação de inertes, trituração e compactação, se necessário) do material, para uma melhor eficiência e operação dos sistemas de conversão térmica.

4 CONCLUSÃO

Diante do crescimento exacerbado da geração de RSU, e da sua destinação na maior parte das vezes inadequada, aliada à queima de combustíveis fósseis por parte das indústrias e das geradoras de energia elétrica, nossa sociedade enfrenta um grande desafio. Com o objetivo de propor soluções para a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera e, principalmente, diminuir os problemas da crise sanitária, a qual envolve o RSU, há diversas rotas para recuperação energética de resíduos, que podem incluir a produção de CDR e tecnologias *Waste-to-Energy*.

O CDR se mostra uma alternativa viável para utilização como combustível sólido em fornos de cimenteiras. A partir dos resultados da caracterização físico-química de frações de rejeitos da triagem de RSU coletados em Imbituba/SC, e de sua comparação com as especificações exigidas por uma empresa fabricante de cimento (Votorantim Cimentos) para utilização de CDR nos seus sistemas de conversão térmica, verificou-se que a aplicação é factível e gera benefícios ambientais, sociais e econômicos.

As práticas de gestão e gerenciamento de RSU do município de Imbituba/SC foram avaliadas, assim como a infraestrutura para a operação do serviço de coleta, transporte, triagem e destinação final dos resíduos. Para tanto, identificou-se a oportunidade de traçar uma rota para produção de CDR através dos rejeitos da coleta seletiva, com a finalidade de utilizá-lo nos fornos de cimento da Votorantim Cimentos. A amostra de rejeito coletada é proveniente da triagem de RSU realizada pela Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Material Reciclável

– COOPERZIMBA, e a mesma foi caracterizada físico-quimicamente para análise de viabilidade de aplicação no setor cimenteiro.

A amostra de RSU analisada continha oito frações de resíduos combustíveis, sendo elas papel/papelão, plástico mole, plástico duro, poliestireno expandido, madeira, trapos, orgânicos e outros. A amostra atendeu aos requisitos de qualidade de CDR da Europa (UNE-EN 15359, 2012) e aos limites para classificação do RSU para fins energéticos no Brasil (ABNT 16849/2020), porém, apresentou não conformidade com as especificações exigidas pela indústria de cimento tomada como referência devido ao teor de cinzas estar acima do limite permitido.

Na intenção de atender aos requisitos para utilização do CDR 50 e do CDR 25, fez-se necessário a remoção da fração “outros”, pois a mesma apresentou alto teor de cinzas. Conforme evidenciaram os cálculos, a mistura de RSU com as sete frações indicadas apresentou PCI, teor de umidade, de cinzas e de cloro em conformidade com as exigências da referida indústria de cimento para aplicação de CDR 50 em pré-calcinador e CDR 25 em queimador principal para a fabricação de cimento. Contudo, conclui-se que na etapa de pré-tratamento uma alternativa benéfica, além da remoção das frações de metal e vidro, é a remoção da fração outros, obtendo-se, portanto, um CDR que atenda aos requisitos técnicos da indústria.

Neste contexto, verificou-se que o CDR analisado é uma alternativa mais interessante que outros combustíveis, como por exemplo carvão ou coque de petróleo, por ser menos prejudicial ao meio ambiente, contribuindo para a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera, diminuindo o passivo ambiental e preservando os recursos naturais. Como se não bastasse isso, o CDR analisado também demonstrou grande potencial energético.

Além da contribuição ambiental, espera-se que a aplicação do RSU nos fornos da cimenteira, em substituição ao combustível fóssil, traga uma economia financeira para o processo. Isso deve ocorrer tanto em questões de logística e transporte, visto que a fábrica de cimento se localiza em uma região muito próxima à cooperativa onde são feitas as triagens dos resíduos, quanto em questão de aquisição da matéria-prima, já que o RSU possui um custo bem abaixo dos demais combustíveis comumente utilizados.

O cenário para os próximos anos é de crescimento na utilização de resíduos na forma de CDR para coprocessamento em fornos de cimenteiras. Novas regulamentações sobre o tema têm sido aprovadas e muitas outras ações estão em andamento, criando assim um ambiente mais favorável de investimentos, o que permitirá um avanço mais rápido e sustentável frente aos enormes desafios em relação à destinação adequada dos resíduos no Brasil.

Dessa forma, pode-se aliar destinação de resíduos no contexto do saneamento básico e setor energético, promovendo avanços a nível nacional em relação a dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), pelo menos, quais sejam: ODS 6 - Água potável e saneamento e ODS 7 - Energia limpa e acessível. Com relação a esse último, há que se considerar que parte do CDR será renovável pela fração de biomassa (matéria orgânica biodegradável) que o compõe.

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Elaine, sou grata por seu profissionalismo e dedicação em que me orientou com as melhores ideias para complementação do trabalho. Às Professoras Dra. Elise e Dra. Silvia, que compuseram a banca examinadora, obrigada por aceitarem participar e colaborar com esta obra. Aos meus colegas do NUDAPE, Adilson, Arthur e Everton, agradeço por me auxiliarem nesta jornada de estudos e pesquisas. Ao time de Eólica, RSU e novas energias da WEG, agradeço pelos materiais e livros concedidos, a qual serviram de complemento para este trabalho. À minha família, em especial a minha mãe Sônia, agradeço

todo o apoio e suporte, nos momentos em que precisei. Ao meu namorado e melhor amigo, Gabriel, obrigada por compreender o meu isolamento em inúmeras noites e finais de semana, e por me incentivar a todo o momento. E a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos.

Por fim, agradeço à COOPERZIMBA, à Votorantim Cimentos, à SATC e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC/2021TR1505), que apoiaram e possibilitaram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA - AEE (Espanha). **ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO**: palas de aerogeneradores. Palas de aerogeneradores. 2021. Disponível em: https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/AEE-2021-Economia-Circular-en-el-sector-eolico_Palas-de-los-Aerogeneradores.pdf. Acesso em: 23 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Panorama do coprocessamento**: uma tecnologia sustentável. Uma tecnologia sustentável. 2021. Ano base 2020. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2021/12/Panorama_Coprocessamento_2021_Ano_Base_2020.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2019**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 5 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2021**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil) (org.). **Resíduos Sólidos Urbanos**: recuperação energética. Recuperação Energética. 2012. Comitê de Valorização Energética. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/informativo_recuperacao_energetica.pdf. Acesso em: 16 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.849**: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos. 1 ed Rio de Janeiro, 2020. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS (ABREN) (Brasil). **3º Fórum de valorização energética de resíduos**. São Paulo, 2022. 28 slides, color.

BERGE, Nicole D.; RO, Kyoung S.; MAO, Jingdong; FLORA, Joseph R. V.; CHAPPELL, Mark A.; BAE, Sunyoung. Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 45, n. 13, p. 5696-5703, 14 jun. 2011. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es2004528>.

BESSI, C.; LOMBARDI, L.; MEONI, R.; CANOVAI, A.; CORTI, A.. 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>.

BRÁS, Isabel; SILVA, Maria Elisabete; LOBO, Germana; CORDEIRO, Ana; FARIA, Miguel; LEMOS, Luís Teixeira de. 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>.

BRASIL, **Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 23/09/2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares** [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p. : il. ; color. Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-65-88265-15-4 (on-line)

CHYANG, Chien-Song; HAN, Yun-Long; WU, Li-Wei; WAN, Hou-Peng; LEE, Hom-Ti; CHANG, Ying-Hsi. An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal. **Waste Management**, [S.L.], v. 30, n. 7, p. 1334-1340, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.018>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI (Brasil). **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. 2021. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 10 set. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999. **Licenciamento de Fornos Rotativos de Produção de Clínquer Para Atividades de Co-Processamento de Resíduos**. 20 mar. 2000. Seção 1, p. 80-83.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Resolução 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. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020.

COOPERZIMBA. **Quem somos.** Disponível em: <http://cooperzimba.com.br/pagina/quem-somos>. Acesso em: 05 jul. 2022.

DIVINO, Natalia Citti de Castro. **AValiação DO POTENCIAL DE REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES DE CATADORES COMO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO – CDR.** UFSC, 2020. 76 p.

ERFO. **About recovered fuels and SRF.** Disponível em: <https://erfo.info/about-srf/>. Acesso em: 5 nov. 2022.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Integrated pollution prevention and control. Reference document on the best available techniques for waste incineration.** 2006.

European Committee for Standardization (ECS), 2002. **Cement, Composition, Specifications, and Conformity Criteria for Common Cements, TS EN 197-1.** Author, Brussels, Belgium.

GALLARDO, Antonio; CARLOS, Mar; BOVEA, M.D.; COLOMER, Francisco J.; ALBARRÁN, Fernando. 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; CARLOS, Mar; COLOMER, Francisco J; EDO, Natalia; JORGE, Andrea. DESIGN OF SOLID RECOVERED FUELS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE AND BIOMASS. **Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (Aeipro)**, Alcoi, p. 1-10, jul. 2020.

Gendebien, A., A. Leavens, K. Blackmore, A. Godley, K. Lewin, K.J. Whiting and R. Davis. 2003. **Refuse derived fuel, current practice and perspectives.** Final report of European Commission-Directorate General Environment, pp.1-8.

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>.

GERA, Dinesh; GAUTAM, Mridul. Emissions from RDF/coal blended fuel combustion. **Chemosphere**, [S.L.], v. 27, n. 12, p. 2353-2363, dez. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90258-7](http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535(93)90258-7).

GIL, Antônio Carlos. **MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA SOCIAL.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.** Governo Federal da Alemanha, 2017.

GOMES, Patrícia Caroline Guedes. **Gestão Integrada de resíduos sólidos: uma aplicação prática**. Appris editora, 2019.

Google Earth. **Mapa de localização - COOPERZIMBA (Imbituba)**. 2022.

GÖTZE, Ramona; BOLDRIN, Alessio; SCHEUTZ, Charlotte; ASTRUP, Thomas Fruergaard. 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>.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1503-1510, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-81232012000600014>.

GROUP, The World Bank. **WHAT A WASTE 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. 2022. Disponível em: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html#:~:text=Worldwide%2C%20waste%20generated%20per%20person,from%200.11%20to%204.54%20kilograms.%20Acesso%20em%2016%20de%20novembro%20de%202022.. Acesso em: 14 jul. 2022.

HASHEM, Fayza S.; RAZEK, Taha A.; MASHOUT, Hani A.. Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 212, p. 275-282, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.316>.

HETTIARACHCHI, Hiroshan; RYU, Sohyeon; CAUCCI, Serena; SILVA, Rodolfo. Municipal Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: issues and potential solutions from the governance perspective. **Recycling**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 19, 10 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling3020019>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População estimada de Imbituba**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

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>.

KARA, Mustafa; GÜNAY, Esin; TABAK, Yasemin; DURGUT, Ufuk; YİLDİZ, Şenol; ENÇ, Volkan. Development of Refuse Derived Fuel for Cement Factories in Turkey. **Combustion Science And Technology**, [S.L.], v. 183, n. 3, p. 203-219, 22 dez. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2010.512580>.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa C.; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. 2018. What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development;. Washington, DC: **World Bank**. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO

KERDSUWAN, Somrat; LAOHALIDANOND, Krongkaew; JANGSAWANG, Woranuch. Sustainable Development and Eco-friendly Waste Disposal Technology for the Local Community. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 79, p. 119-124, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.493>.

KIMAMBO, Offor N; SUBRAMANIAN, P. Energy efficient refuse derived fuel (RDF) from municipal solid waste rejects: a case for coimbatore. **International Journal Of Environment**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 205-215, 30 maio 2014. Nepal Journals Online (JOL). <http://dx.doi.org/10.3126/ije.v3i2.10530>.

KOBYASHI, Nobusuke; ITAYA, Yoshinori; PIAO, Guilin; MORI, Shigekatu; KONDO, Motohiro; HAMAI, Michhiko; YAMAGUCHI, Masataka. The behavior of flue gas from RDF combustion in a fluidized bed. **Powder Technology**, [S.L.], v. 151, n. 1-3, p. 87-95, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2004.11.038>.

KOMILIS, Dimitrios; EVANGELOU, Alexandros; GIANNAKIS, Georgios; LYMPERIS, Constantinos. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. **Waste Management**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 372-381, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.

LABIDI, Abdelkader; SALABERRIA, Asier M.; FERNANDES, Susana C.M.; LABIDI, Jalel; ABDERRABBA, Manef. 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>.

MACHADO, Adilson Geraldo. **Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina**. 2022. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Sustentabilidade, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022.

MADLOOL, N.A.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M.s.; RAHIM, N.A.. 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>.

OBERNBERGER, I; BRUNNER, T; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 973-982, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>.

OLIVEIRA, Cristhiano Baccin. DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE CDR. **Fórum de valorização energética de resíduos**. RENOVA. 2021. 17 slides, color.

PESSOA FILHO, José Silvio. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.3004>.

PIAIA, Eduarda. **Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de Combustível Derivado de Resíduos - CDR**. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

PILISSÃO, Y. L.; Machado, A. G.; Virmond, E.; Watzko, E. S. **ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN THE BRAZILIAN SCENARIO**. 2021. 20 v. Curso de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2021. Cap. 3.

Pereira, Christiane. **CDR como ferramenta para a Gestão Sustentável de RSU**. Florianópolis, 2021. 57 slides, color.

PROAÑO, Laura; SARMIENTO, Alfonso T.; FIGUEREDO, Manuel; COBO, Martha. Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: a system dynamics approach. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 263, p. 121457, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121457>.

RAHMAN, Azad; RASUL, M.G.; KHAN, M.M.K.; SHARMA, S.. 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; IONESCU, Gabriela; FEDELE, Arcangela; PALMIERI, Eleonora; RANIERI, Ada Cristina; CAMPANARO, Vincenzo. 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>.

ROADMAP tecnológico do cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinazir Costa do Espírito. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 1-10, mar. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522011000100003>.

SAHA, Palash Kumar; KARSTENSEN, Kåre Helge. Co-processing of Alternative Fuels and Resources in Indian Cement Industry—Baseline and Potential. **Waste Valorisation And Recycling**, [S.L.], p. 19-29, 2019. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-2784-1_2.

SAKRI, Asma; AOUABED, Ali; NASSOUR, Abdallah; NELLES, Michael. Refuse-derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria. **Waste**

Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 1174-1184, 6 jan. 2021. SAGE Publications.
<http://dx.doi.org/10.1177/0734242x20982277>.

SHEHATA, Nabila; OBAIDEEN, Khaled; SAYED, Enas Taha; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; MAHMOUD, Mohamed S.; EL-SALAMONY, Abdel-Hay R.; MAHMOUD, Hamada M.; OLABI, A.G.. Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 163, p. 558-573, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.052>.

SHUMAL, Mohammad; JAHROMI, Ahmad Reza Taghipour; FERDOWSI, Ali; DEHKORDI, Seyed Mohammad Mehdi Noorbakhsh; MOLOUDIAN, Amin; DEHNAVI, Ali. 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>.

SILVA FILHO, Valdemar Francisco da; BATISTELLA, Luciane; ALVES, José Luiz Francisco; SILVA, Jean Constantino Gomes da; ALTHOFF, Christine Albrecht; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz; JOSÉ, Humberto Jorge. Evaluation of gaseous emissions from thermal conversion of a mixture of solid municipal waste and wood chips in a pilot-scale heat generator. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 141, p. 402-410, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.032>.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números da indústria**. SNIC, 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2020**. SNIC, 2020. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Custo anual do município de Imbituba com a gestão de RSU**. SNIS, 2018.

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

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

SUKARNI, Sukarni. Exploring the potential of municipal solid waste (MSW) as solid fuel for energy generation: case study in the malang city, indonesia. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], p. 1-8, 26 out. 2016. Author(s). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4965733>.

TISI, Yuri Schmitke A. Belchior. **WASTE-TO-ENERGY**: recuperação energética como forma ambientalmente adequada de destinação dos resíduos sólidos urbanos. Brasília: Synergia Editora, 2019. 240 p.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM) (Geneva). Secretariat Of The Basel Convention. **BASEL CONVENTION**: on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal. **ON THE CONTROL OF TRANSBOUNDARY MOVEMENTS OF HAZARDOUS WASTES AND THEIR DISPOSAL**. 2011. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8385/-Basel%20Convention%20on%20the%20Control%20of%20Transboundary%20Movements%20of%20Hazardous%20Wastes%20-20113644.pdf?sequence=2&%3BisAllowed=>. Acesso em: 5 set. 2022.

U.S. EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). (2011). **DRAFT: global anthropogenic emissions of non-CO2 greenhouse gases: 1990–2030**. (EPA 430-D11-003); USA. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/economics/international.html>.

VICZEK, S.A.; ALDRIAN, A.; POMBERGER, R.; SARC, R.. 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>.

VIRMOND, Elaine; ALBRECHT, Waldir; ALTHOFF, Christine A.; ANDERSEN, Silvia L. F.; SENA, Rennio F.; MOREIRA, Regina F. P. M.; JOSÉ, Humberto J.. Gaseous emissions from co-combustion of biosolids from the meat processing industry with wood. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [S.L.], v. 40, n. 5, p. 1-14, 9 mar. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.13633>.

VIRMOND, Elaine; SENA, Rennio F. de; ALBRECHT, Waldir; ALTHOFF, Christine A.; MOREIRA, Regina F.P.M.; JOSÉ, Humberto J.. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management**, [S.L.], v. 32, n. 10, p. 1952-1961, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.014>.

Votorantim Cimentos. **Especificações Básicas para Recebimento de CDRU 50 25**. Santa Catarina, 2021. 9 slides, color.