

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Nuclear
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Raoni Junio Martins Venancio

**ANÁLISE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE
*BLEND*S PARA O COPROCESSAMENTO: UMA VISÃO SOB O PONTO DE VISTA
ENERGÉTICO**

Belo Horizonte

2022

Raoni Junio Martins Venancio

**ANÁLISE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE
BLENDS PARA O COPROCESSAMENTO: UMA VISÃO SOB O PONTO DE VISTA
ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Linha de Pesquisa: Avaliação Tecnológica, Socioeconômica e ambiental de sistemas energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera

Belo Horizonte

2022

V448a

Venancio, Raoni Junio Martins.

Análise de resíduos industriais utilizados na produção de *blends* para o coprocessamento [recurso eletrônico] : uma visão sob o ponto de vista energético / Raoni Junio Martins Venancio. - 2022.

1 recurso online (95 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Eduardo Velasquez Cabrera.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 90-95.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Combustível alternativo - Teses.
3. Resíduos industriais - Teses. I. Cabrera, Carlos Eduardo Velasquez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE BLENDS PARA O COPROCESSAMENTO: UMA VISÃO SOB O PONTO DE VISTA ENERGÉTICO

RAONÍ JÚNIO MARTINS VENANCIO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós- Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 21 de dezembro de 2022, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Carlos Eduardo Velasquez Cabrera - Orientador
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Prof(a). Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino
UFOP

Prof(a). Maria Angela de Barros Correia Menezes
CDTN/CNEN

Prof(a). Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia
Nuclear – UFMG

Belo Horizonte, 21 de dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre está comigo, me abençoando, me dando forças para romper e enviando o socorro no momento certo. Deus tem cuidado de mim.

À minha família, Martins Teixeira, que sempre apoiou a minha trajetória acadêmica e entendeu as minhas faltas, falhas, excessos e angústias, me acolhendo. Vocês sempre acreditaram em mim e a força de vocês me faz querer chegar mais longe. Mãe e família, aos poucos estou chegando aonde almejamos.

Às agências brasileiras de financiamento da pesquisa, CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), PRPq (Pró-reitora de Pesquisa) da Universidade Federal de Minas Gerais e FUNDEP (Fundação de desenvolvimento da pesquisa) pelo apoio.

A todos os meus amigos, que durante o período do mestrado me acompanharam e viram meus momentos de dedicação, afastamento, faltas, falhas, desânimo, mas acreditaram em mim. Em especial, Jeferson Souza e Igor Caetano.

Neste momento não poderia deixar de agradecer uma pessoa fundamental no meu desenvolvimento pessoal e que cuida de mim há aproximadamente 6 anos, minha psicóloga, Helenice Fernandes. Obrigado por seus ensinamentos e por todas as vezes que me acolheu durante todos estes anos e principalmente pela força que me deu, durante o processo do mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Drº. Carlos Eduardo Velasquez Cabreara, que recebeu a proposta da dissertação e decidiu trabalhar este tema juntamente comigo. Além disso, agradeço a paciência que teve durante o processo.

A empresa que disponibilizou os dados e tornou possível conhecer os resíduos utilizados atualmente, bem como estimar o poder calorífico.

Agradeço também a Maria Ângela de Barros Correia Menezes, que foi minha orientadora de iniciação científica. Você me mostrou e me ensinou, com seu jeito especial de fazer a diferença na vida dos seus alunos, que era possível chegar até aqui.

Aos colegas do departamento, que caminharam comigo durante o curso, compartilhando os momentos de alegria e de luta.

Resumo

Decorrente as crises do petróleo na década de 70, a indústria do cimento que utilizava combustíveis derivados do petróleo, passou a voltar sua atenção para o uso de combustíveis alternativos derivados de resíduos industriais. No Brasil, este movimento se iniciou nos anos 90. Entre os anos de 1997 e 2000 foi visto que o uso dos combustíveis alternativos era em média de 10%, sendo o máximo atingido de 18%. A prática de utilizar resíduos como combustível alternativo é chamada de coprocessamento. Devido a gama de resíduos que podem ser utilizados, estes precisam ser processados previamente, a fim de se obter um material mais uniforme e de queima mais estável. O processo de preparo destes resíduos consiste basicamente em misturar, triturar e moer os resíduos tendo como material final, o *blend*. Ao decorrer dos anos a indústria do cimento foi constatando que o uso dos *blends* como combustível alternativo e o ato de coprocessar resíduos apresentava vantagens como a diminuição dos custos com combustível, redução das emissões de gases poluentes e em alguns casos se apresentar como uma tecnologia ambientalmente mais adequada. Em contrapartida alguns ambientalistas e pesquisadores da área demonstram certa insatisfação com algumas práticas do coprocessamento. O atual cenário do coprocessamento no Brasil, conta com 38 plantas licenciadas. A utilização dos combustíveis alternativos tem ganhado força, com isso, é visto a redução na utilização de combustíveis fósseis. Em 2016, o uso dos combustíveis alternativos era de 15,10%. Mas em 2020 era de 28%, ultrapassando a projeção realizada para o ano, que era de 23%. Por outro lado, estima-se que para o ano 2030 a projeção é de 35%. Ainda, o objetivo da indústria brasileira do cimento é atingir a marca de 45% até 2050. A primeira resolução sobre o coprocessamento no Brasil foi publicada em 1999. Dado o cenário do coprocessamento e seus avanços, após mais de 20 anos, esta foi revogada. A nova resolução apresenta modificações como, o aumento da gama de resíduos que podem ser coprocessados, permissão para utilizar resíduos sem valor energético desde que comprovado ganhos ambientais, aprovação no uso de resíduos do serviço de saúde, resíduos do agronegócio e também retirou a seção que tratava sobre as unidades de mistura e pré-condicionamento de resíduos. Visto os avanços no uso de resíduos como combustível alternativo, foi proposta a análise dos resíduos utilizados para formulação dos *blends* na empresa A, no período de janeiro a dezembro de 2020. A primeira análise consistiu na determinação gravimétrica dos resíduos. Após isto foi selecionado em cada mês, os 10 resíduos com maior massa, a fim de estimar o poder calorífico do *blend* produzido na empresa A. A análise constatou que os *blends* da empresa A podem alcançar de 3.288,59 kcal/kg a 4.927,20 kcal/kg. E que os resíduos mais utilizados foram a borra ácida, o lodo de ETE e os óleos contaminados. Quanto aos resíduos utilizados, não é observada uma mudança considerável entre os resíduos relatados desde o início da técnica, considerando a empresa estudada. No geral, são resíduos petroquímicos, siderúrgicos, de ETE e de diversos materiais contaminados.

Palavras-Chave: Coprocessamento. *Blend*. Combustível alternativo. Resíduo Industrial.

Abstract

Due to the oil crisis in the 1970s, the cement industry, which used fossil fuels, began to turn its attention to the use of alternative fuels derived from industrial waste. In Brazil, this movement began in the 1990s. Between 1997 and 2000, it was seen that the use of alternative fuel averaged 10%, with a maximum of 18%. The practice of using waste as an alternative fuel is known as co-processing. Due to the variety of residues that can be used, they need to be processed beforehand, to obtain a uniform material and a more stable burning. The process of preparing these residues consists of mixing, crushing, and grinding the residues with the final material, also called *the blend of waste*. The cement industry has discovered over the years that using blends as an alternative fuel and waste co-processing activities has benefits such as lower fuel costs, lower polluting gas emissions, and lower thermal energy consumption in the clinker formation process, and in some cases presents itself as a more environmentally appropriate technology. On the other hand, some environmentalists and researchers in the area show some dissatisfaction with some co-processing practices. The current scenario of co-processing in Brazil has 38 licensed plants. The use of alternative fuels has gained strength, and with that it has come a reduction in the use of fossil fuels. In 2016, the use of alternative fuels was 15.10%. In 2020, it was 28%, exceeding the projection made for the year, which was 23%. For the year 2030, the projection is 35%. The objective of the Brazilian cement industry is to reach 45% by 2050. The first law on co-processing in Brazil was published in 1999. Given the co-processing scenario and its advances, it was replaced after more than 20 years. The new law makes changes such as increasing the amount of waste that can be co-processed, allowing the use of waste with no energy value if environmental gains are demonstrated, requiring waste use approval from the health service, and removing the section on waste mixing and preconditioning units. Given the advances in the use of waste as an alternative fuel, it was proposed to analyze the waste used to formulate the *blends* in Company A from January to December 2020. The first analysis consisted of the gravimetric determination of waste. After that, the 10 residues with the highest mass were selected each month to estimate the calorific value of the blend produced in company A. The analysis found that the blend of company A could range from 3,288.59 kcal/kg to 4,927.20 kcal/kg. The most used were acid residue sludge, sludge from effluent treatment plants, and contaminated oils. About the use of waste, a considerable change between their sides reported since the beginning of the technique has not been observed, according to the studied company. In general, they are petrochemical, steel, ETP, and various contaminated material residues.

Keywords: Co-processing. *Blend of waste*. Alternative Fuel. Industrial Waste.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CDRU – Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos
CEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
CEMBUREAU - European Cement Association
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CL – Campo Limpo
CO₂ – Dióxido de carbono
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes
ETP – Effluent Treatment Plant
GCCA – Global Cement and Concrete Association
IEA – International Energy Agency
INEA – Instituto Estadual do Ambiente
IT – Instrução Técnica
MG – Minas Gerais
MSW – Municipal Solid Waste
PCB's – Bifenilas policloradas
PCI – Poder Calorífico Inferior
PCS – Poder Calorífico Superior
PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PR – Paraná
SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP – São Paulo
UMPCR - Unidade de Mistura e Pré-condicionamento de Resíduos

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS INDÚSTRIAS NO BRASIL, POR ESTADO	20
FIGURA 2 - PRODUÇÃO DE CIMENTO POR REGIÃO NO BRASIL PARA OS ANOS DE 2011, 2016 E 2020	20
FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE CIMENTO NA REGIÃO SUDESTE EM 2020	21
FIGURA 4 - PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CIMENTO	22
FIGURA 5 - SISTEMA DE PRÉ-AQUECIMENTO - TORRES DE CICLONE	23
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO USO DA ENERGIA TÉRMICA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO	25
FIGURA 7 - CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO NO BRASIL (2000-2019)	26
FIGURA 8 - EVOLUÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS, NO BRASIL (2016-2020)	29
FIGURA 9 - PROJEÇÃO DO USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO BRASIL (2020-2050)	31
FIGURA 10 - USO DOS <i>BLENDS</i> E DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS SELECIONADOS (2014-2020) NO BRASIL	33
FIGURA 11 - EVOLUÇÃO DO COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS NO BRASIL (2000-2020) ...	35
FIGURA 12 – PÁGINA INICIAL DO SIAM: ACESSO DO VISITANTE	53
FIGURA 13 - ABA DE PESQUISA SOBRE INFORMAÇÕES DOS EMPREENDIMENTOS	54
FIGURA 14 – RANKING DA MASSA DOS RESÍDUOS RECEBIDOS NA EMPRESA A NO ANO DE 2020	56
FIGURA 15 – RANKING DA FREQUÊNCIA DE RECEBIMENTO DOS RESÍDUOS	57
FIGURA 16 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM JANEIRO DE 2020	59
FIGURA 17 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE JANEIRO DE 2020	61
FIGURA 18 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM FEVEREIRO DE 2020	63
FIGURA 19 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE FEVEREIRO DE 2020	64
FIGURA 20 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM MARÇO DE 2020	65
FIGURA 21 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE MARÇO DE 2020	66
FIGURA 22 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM ABRIL DE 2020	67
FIGURA 23 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE ABRIL DE 2020	68
FIGURA 24 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM MAIO DE 2020	69
FIGURA 25 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE MAIO DE 2020	70
FIGURA 26 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM JUNHO DE 2020	71
FIGURA 27 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE JUNHO DE 2020	72
FIGURA 28 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM JULHO DE 2020	73
FIGURA 29 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE JULHO DE 2020	74
FIGURA 30 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM AGOSTO DE 2020	74
FIGURA 31 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE AGOSTO DE 2020	75
FIGURA 32 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM SETEMBRO DE 2020	76
FIGURA 33 - ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NO MÊS DE SETEMBRO DE 2020	77
FIGURA 34 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM OUTUBRO DE 2020	78
FIGURA 35 - PERFIL DO ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS EM OUTUBRO DE 2020	79
FIGURA 36 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM NOVEMBRO DE 2020	80
FIGURA 37 - PERFIL DO ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS EM NOVEMBRO DE 2020	81
FIGURA 38 - PERFIL DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA EM DEZEMBRO DE 2020	82
FIGURA 39 - PERFIL DO ESTADO FÍSICO DOS RESÍDUOS UTILIZADOS EM DEZEMBRO DE 2020	83
FIGURA 40 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS <i>BLENDS</i> PRODUZIDOS NA EMPRESA A EM 2020	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESÍDUOS UTILIZADOS PARA O COPROCESSAMENTO EM 1993	28
TABELA 2 - RESÍDUOS UTILIZADOS PARA O COPROCESSAMENTO EM 2018	29
TABELA 3 - INFORMAÇÕES SOBRE AS LEGISLAÇÕES ESTADUAIS NO BRASIL.....	37
TABELA 4 - COMBUSTÍVEIS E MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVOS NÃO SUJEITOS À APLICAÇÃO DA RESOLUÇÃO CONAMA N°499/2020	43
TABELA 5 - TEORES MÁXIMOS DE METAIS NO BLEND PARA ENTRADA NO FORNO, PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS.....	45
TABELA 6 - RESULTADO PRELIMINAR DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA NO ANO DE 2020.....	52
TABELA 7 - PORCENTAGEM DOS 10 RESÍDUOS COM MAIOR MASSA DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2020	58
TABELA 8 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM JANEIRO DE 2020	62
TABELA 9 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM FEVEREIRO DE 2020.....	64
TABELA 10 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM MARÇO DE 2020	66
TABELA 11 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM ABRIL DE 2020.	68
TABELA 12 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM MAIO DE 2020..	70
TABELA 13 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM JUNHO DE 2020	71
TABELA 14 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM JULHO DE 2020	73
TABELA 15 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM AGOSTO DE 2020	75
TABELA 16 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM SETEMBRO DE 2020.....	77
TABELA 17 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM OUTUBRO DE 2020.....	79
TABELA 18 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM NOVEMBRO DE 2020.....	81
TABELA 19 - ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BLEND EM DEZEMBRO DE 2020.....	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1 Breve cenário da indústria brasileira do cimento.....	19
3.2 Processo de produção do cimento.....	21
3.3 Energia térmica na indústria do cimento	24
3.4 Resíduos industriais e combustíveis alternativos.....	26
3.5 Legislação.....	35
3.5.1 Lei n°12.305/2010.....	38
3.5.2 CONAMA n° 264/1999 vs. CONAMA n° 499/2020	39
3.5.3 COPAM n°154/2010	44
3.6 Estimativa do poder calorífico	45
4. FORMULAÇÃO DE <i>BLENDS</i>.....	48
4.1 Empresa A	48
4.2 Descrição do processo.....	48
5. METODOLOGIA.....	50
5.1 Coleta de dados	50
5.2 Descrição	50
5.3 Organização dos dados	50
5.4 Análise dos resíduos.....	51
5.5 Documentos ambientais e científicos.....	52
6. RESULTADOS.....	55
6.1 Dados Brutos	55
6.2 Análise mensal: Cenários	57
6.1.1 Cenário 1 - Janeiro	58
6.1.2 Cenário 2 – Fevereiro.....	62
6.1.3 Cenário 3 – Março	65
6.1.4 Cenário 4 – Abril.....	67
6.1.5 Cenário 5 – Maio.....	68
6.1.6 Cenário 6 – Junho.....	70
6.1.7 Cenário 7 – Julho.....	72

6.1.8 Cenário 8 – Agosto	74
6.1.9 Cenário 9 – Setembro.....	76
6.1.10 Cenário 10 – Outubro	77
6.1.11 Cenário 11 – Novembro.....	80
6.1.12 Cenário 12 – Dezembro.....	82
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS.....	90

1. INTRODUÇÃO

A indústria do cimento demanda grande quantidade de energia decorrente de seu processo de produção, em especial, na formação do clínquer. O processo de produção do clínquer, ocorre em fornos rotativos e a reação de clínquerização é realizada a aproximadamente 1.450°C. Para atingir as altas temperaturas requeridas nesta etapa, se faz necessário a alimentação de grandes quantidades de combustíveis (ROCHA, LINS e SANTO, 2011).

Sabe-se que os combustíveis primários mais utilizados como fonte energética em fornos rotativos clínquer são: o coque de petróleo, óleo combustível e carvão mineral. Tais fontes são advindas de recursos não renováveis, possuem alto potencial poluidor e custos elevados (TOSTA, SOUZA e SILVA, 2007). Com isso, buscam-se alternativas que possam substituir os combustíveis primários, reduzindo os efeitos poluentes, diminuindo custos e se apresentarem ambientalmente mais adequadas.

Uma tecnologia que surgiu em função de um cenário de crises e demanda energética que tem se mostrado importante neste sentido é o coprocessamento de resíduos. Esta tecnologia consiste na combustão de diversos resíduos industriais e urbanos, em fornos rotativos clínquer, como alternativa ao combustível primário (fóssil). Além disso, o coprocessamento também utiliza resíduos industriais, como substituição parcial da matéria-prima, na produção do cimento (ABCP, 2019).

Os resíduos que podem ser utilizados no coprocessamento são diversos e bastante heterogêneos, isto é, advêm de diversos geradores, possuem dimensões e formas distintas. Além disso, podem ser líquidos, sólidos e pastosos. Sendo assim, torna-se necessário processá-los previamente, de modo a obter um material com propriedades mais homogêneas, de queima mais estável e que atenda aos requisitos técnicos de produção e ambientais (MARINGOLO, 2001; HOLCIM e GTZ, 2006).

O processo de preparo dos resíduos para o coprocessamento é conhecido popularmente como *blendagem* ou formulação de *blends*, que consiste na mistura, trituração, homogeneização e moagem dos resíduos (HOLCIM e GTZ, 2006), formando como material final, o *blend*, que é um combustível alternativo utilizado em fornos rotativos clínquer.

Por se tratar de uma mistura muito heterogênea, a escolha dos resíduos a serem coprocessados requer uma certa atenção, visto que o *blend* final deve atender os requisitos técnicos para combustão nos fornos rotativos clínquer e aos demais parâmetros estabelecidos na legislação, no âmbito federal e estadual. Ainda dentro dessas considerações, a unidade de preparo do *blend* deve atender também aos interesses da indústria cimenteira, visto que dentro da legislação, a cimenteira pode determinar as características do *blend* que sejam mais ideais para a combustão.

Estes requisitos tratam-se de importantes parâmetros que devem ser avaliados e controlados, a fim de assegurar que a utilização do *blend* como combustível alternativo forneça energia suficiente para o processo, atenda a legislação e aos requisitos técnicos. Alguns desses parâmetros são: umidade, teor de cloro, teor de cinzas, metais, o poder calorífico, compostos orgânicos e inorgânicos, entre outros.

Em sua maioria, os resíduos utilizados na produção do *blend* são gerados em atividades industriais, ou seja, a depender do tipo de processo que o resíduo foi gerado, alguns parâmetros podem ser encontrados de forma indesejada. Existe ainda a possibilidade do próprio resíduo, independente do processo em que ele foi gerado, apresentar algum parâmetro específico que seja indesejado para a combustão nos fornos, o que é o caso das embalagens plásticas que já possuem certo teor de cloro.

Uma outra questão a ser apontada é que os *blends* produzidos por uma mesma unidade apresentam diferentes valores para o mesmo parâmetro analisado. Isto ocorre devido ao fluxo de recebimento dos resíduos que embora constante, nem sempre obedecem a uma periodicidade, quantidade e que além disso, novos resíduos podem ser incorporados na produção do *blend*.

Deste modo, torna-se fundamental conhecer quais são os resíduos utilizados na produção dos *blends*, avaliando os mais utilizados, bem como sua origem, quantidade, estado físico e sua contribuição energética.

Com isso busca-se analisar os resíduos industriais utilizados numa dada empresa, que será chamada de empresa A, no ano de 2020, a fim de compreender quais são os resíduos mais utilizados, os que mais contribuem para o poder calorífico do *blend*, o estado físico destes resíduos, realizar uma estimativa do poder calorífico

para cada mês e determinar quais são os resíduos que podem ser considerados a base do *blend*.

Além disso, será realizado um levantamento sobre o atual cenário do coprocessamento no Brasil, visando avaliar a evolução da técnica ao longo dos anos. Para isso serão considerados os dados do coprocessamento, da indústria do cimento, dados energéticos, a legislação e os resíduos utilizados.

Ressalta-se que os resíduos sólidos urbanos e de pneus inservíveis, embora utilizados no coprocessamento como fonte energética, não fazem parte do escopo e somente serão citados quando conveniente, isto é, em termos de comparação e quando aparecerem em destaque. Serão considerados e avaliados apenas os resíduos industriais.

A dissertação está dividida em 7 capítulos. Os capítulos 1 e 2 introduzem resumidamente o tema, suas particularidades e os objetivos da pesquisa. O capítulo 3 consiste na revisão da literatura que apresenta o atual cenário do coprocessamento no Brasil sob o ponto de vista energético e as principais mudanças na legislação brasileira, onde algumas seções são dedicadas especificamente às legislações.

O capítulo 4 trata sobre a empresa selecionada para avaliação dos resíduos utilizados como combustível alternativo, as formas de seleção da empresa e descreve também o processo de produção dos *blends*. O capítulo 5 é a metodologia para a análise dos resíduos, demonstrando as etapas e considerações feitas para a análise mensal dos *blends* produzidos pela empresa A.

O capítulo 6 traz uma análise sobre os resíduos utilizados para a produção de *blends* que posteriormente serão enviados às cimenteiras para serem utilizados como combustível alternativo, estimando o poder calorífico que tais resíduos podem fornecer, os principais resíduos utilizados, geradores e seu estado físico. A empresa analisada fica localizada no estado de Minas Gerais.

O capítulo 7 são as considerações finais que tratam das conclusões e observações constatadas durante a pesquisa, evidenciando os dados apresentados e

os comparando com a teoria, prática e informações apresentadas ao longo dos anos, destacando o atual cenário das atividades do coprocessamento no Brasil.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O coprocessamento apresenta diversas vertentes, isto é, podemos estar falando de combustível, matéria-prima, resíduos, saúde ocupacional, emissão, meio ambiente, entre outros. Neste caso, dentro do tema do coprocessamento é tratado a respeito de resíduos industriais que são utilizados como combustíveis alternativos em fornos rotativos na indústria do cimento.

Visto as particularidades apresentadas, o coprocessamento de forma geral passa a ser mais conhecido do que algumas de suas vertentes propriamente ditas. Com isso, tratar uma delas de forma mais centralizada se torna necessário, sendo este o foco da pesquisa.

Deste modo, busca-se apresentar um tema que está intrinsicamente ligado ao coprocessamento, os *blends* de resíduos industriais que são utilizados como combustível alternativo, analisando as questões que tangem ambos, as suas particularidades, processo de produção, legislação, contribuição energética, os benefícios e alguns pontos de atenção.

2.2 Objetivos específicos

- Discutir as principais mudanças na legislação
- Analisar os resíduos de uma determinada empresa
- Identificar os principais resíduos utilizados
- Apontar os resíduos que mais podem contribuir no poder calorífico do *blend*
- Determinar qual é a base de resíduos utilizados no *blend*
- Apresentar os principais ramos que destinam resíduos para a empresa selecionada
- Demonstrar os pontos e negativos do coprocessamento
- Apresentar diferentes pontos de vista sobre o coprocessamento no Brasil

3. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura tem como foco apresentar o atual cenário do coprocessamento no Brasil, incluindo dados da produção de cimento, dados energéticos, a legislação vigente e mudanças ocorridas, os resíduos utilizados e a evolução do coprocessamento.

3.1 Breve cenário da indústria brasileira do cimento

No cenário mundial, segundo estimativas da *U.S. Geological Survey* (2021) no ano de 2020, o Brasil ocupava a 8º posição no ranking dos maiores produtores de cimento. De acordo com CEMBUREAU (2021) em 2020, o Brasil representava a 7º posição no ranking¹.

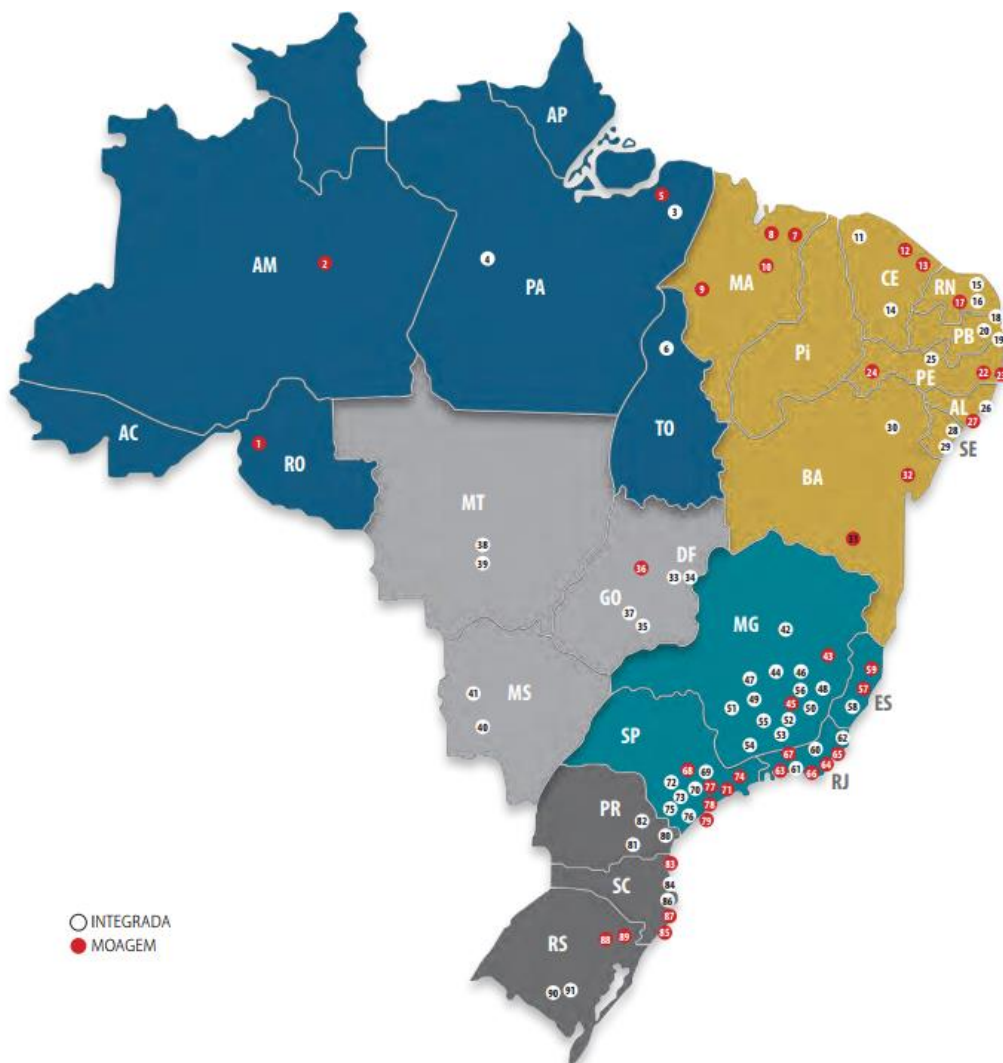
Segundo o último relatório publicado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento –SNIC (2021^a), no Brasil, existem 91 indústrias cimenteiras, sendo elas controladas por 22 grupos industriais. Das 91 indústrias, 38 são licenciadas para o coprocessamento de resíduos (SNIC, 2021^b). A figura 1 mostra a distribuição das indústrias no país.

O maior polo industrial do cimento está localizado na região sudeste do país, nos estados de Minas Gerais com 15 plantas, São Paulo com 12, Rio de Janeiro com 8 e por último o estado do Espírito Santo com 3 plantas (SNIC, 2021^a). A figura 2 mostra que os estados citados anteriormente estão localizados na região sudeste que contempla os maiores produtores de cimento no Brasil, segundo SNIC (2021^a) e a figura 3 mostra a produção mensal desta região no ano de 2020, sendo o total produzido de 28,49 milhões de toneladas.

No ano de 2020, a produção nacional do cimento foi de pouco mais de 61 milhões de toneladas. No ano seguinte houve um aumento, onde a produção foi de 65,8 milhões de toneladas (SNIC, 2021^c).

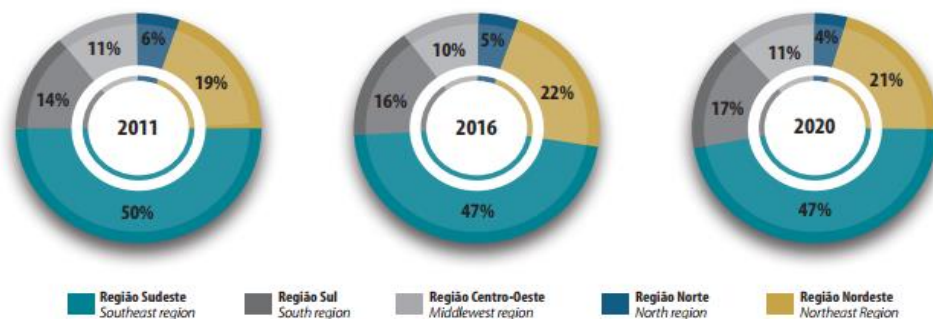
¹ Considerando os países participantes do grupo G-20.

Figura 1 - Localização das indústrias no Brasil, por estado



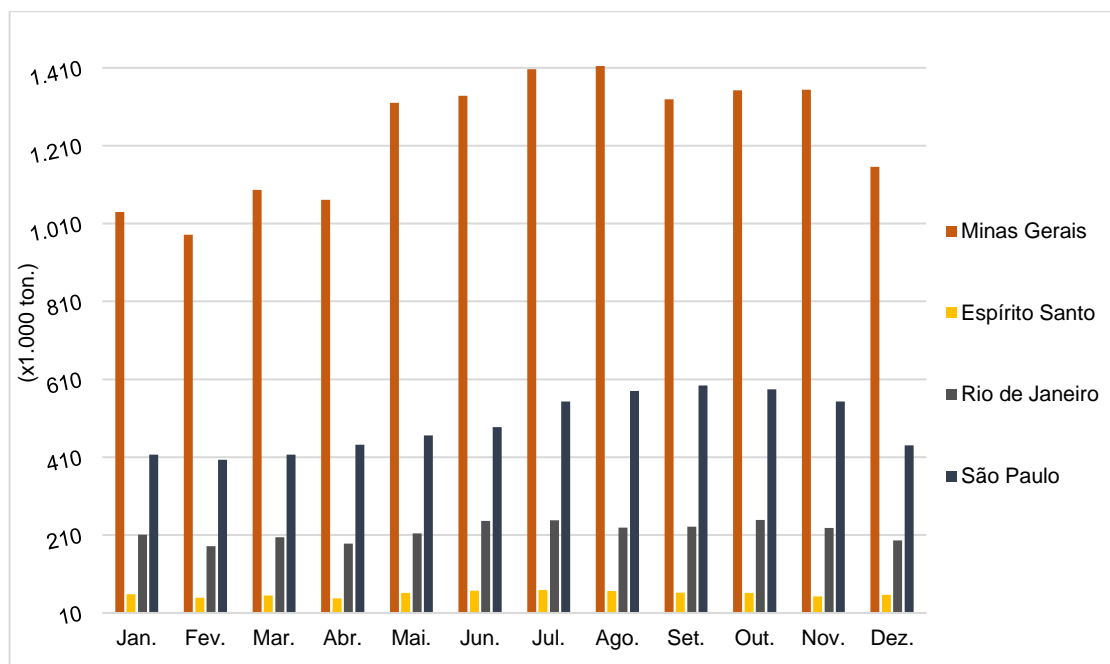
Fonte: ABCP, 2021.

Figura 2 - Produção de cimento por região no Brasil para os anos de 2011, 2016 e 2020



Fonte: SNIC, 2021^a.

Figura 3 - Produção de cimento na região sudeste em 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022. Dados: CBIC *apud* SNIC, 2022.

3.2 Processo de produção do cimento

O processo de produção do cimento, inicia-se juntamente com o processo de mineração e extração de seus principais constituintes. Os principais constituintes do cimento são (CIMENTO ITAMBÉ, 2007; LIMA, 2011):

- Calcário: constituído basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3) sendo o mineral majoritário na composição do clínquer. A depender das condições geológicas podem ser encontrados na rocha impurezas desejáveis como óxido de ferro, silício, alumínio e também as indesejáveis como os óxidos de magnésio, sódio e potássio;
- Argila: sendo seu constituinte de interesse o óxido de alumínio (Al_2O_3).
- Minério de ferro e Areia: sendo os constituintes de interesse o óxido de ferro III (Fe_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2);
- Gesso: sendo os constituintes de interesse a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4).

- Escória de alto forno: pode ser utilizada ou não, dependerá do tipo de cimento que se deseja. O tipo de cimento mais conhecido que possui este constituinte é o cimento de alto forno.

O processo de mineração pode ser realizado por ação mecânica ou através de detonações, com a finalidade de fracionar a rocha. Ainda com a mesma finalidade, a rocha extraída passa por um britador, de modo a reduzir ainda mais a granulometria do material, atingindo tamanhos mais adequados ao processo. Após este processo, o material britado com granulometria de aproximadamente 25 mm ou menor, é encaminhado aos silos, vertical ou horizontal, para a pré-homogeneização e dosagem, onde na homogeneização ocorre a mistura da argila e do calcário na proporção desejada e a dosagem é realizada para corrigir a composição química da rocha extraída (CIMENTO ITAMBÉ, 2007). Um exemplo de uma planta de cimento é demonstrado na figura 4.

Figura 4 - Processo de produção do cimento



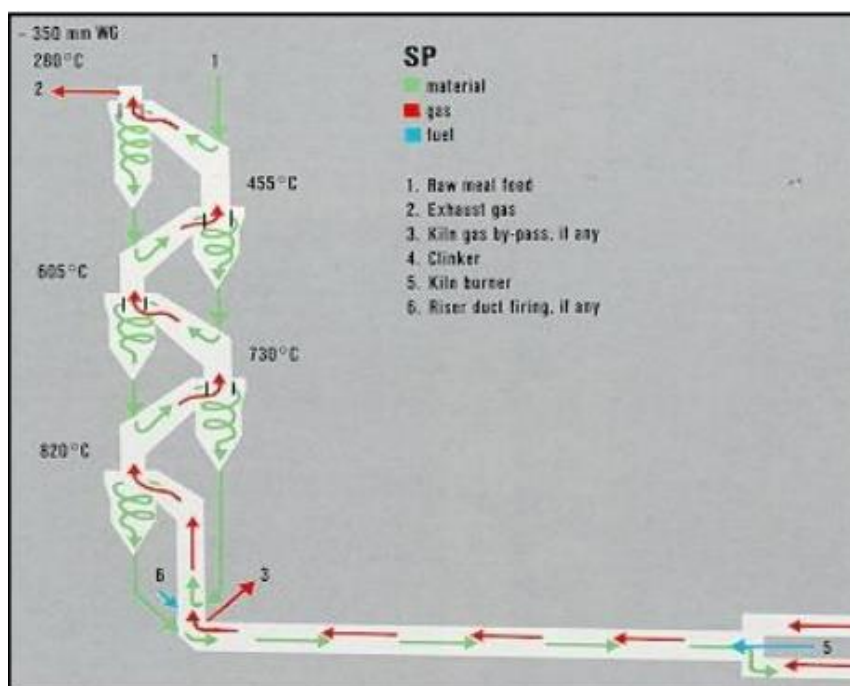
Fonte: CEMBUREAU, 2020.

A próxima etapa consiste na moagem deste material, no moinho de farinha ou cru, onde a mistura de argila, calcário e seus aditivos são moídos, formando um material muito fino, o que configura o nome: farinha ou cru (INDÚSTRIA HOJE, 2014). Em seguida passa por um homogeneizador para obter uma mistura mais adequada.

Estes materiais são adicionados de modo a configurar a melhor qualidade do clínquer, principal constituinte do cimento.

O processo a seguir trata-se do pré-aquecimento e pré-calcinação da farinha. Consiste em uma torre – conjunto de ciclones, conforme descreve a figura 5 onde, os gases oriundos do forno rotativo promovem o pré-aquecimento da farinha e os gases atingem temperaturas próximas a 820°C na saída deste sistema. O sistema de pré-calcinação conta um maçarico secundário e fica localizado ao final do sistema de pré-aquecimento, onde é alimentado com combustíveis para o fornecimento de calor ao processo e conta também com os gases provenientes do forno. Nesta etapa a temperatura dos gases gerados no pré-calcinador pode alcançar de 850 - 1.000°C. O processo de calcinação segue ocorrendo na zona inicial do forno rotativo (MARINGOLO, 2001).

Figura 5 - Sistema de pré-aquecimento - Torres de ciclone



Fonte: LIMA,2011 *apud* ECL, 2009.

A formação do clínquer acontece nos fornos rotativos, cuja reação de clínquerização ocorre a aproximadamente 1.450°C, onde há a transformação química dos constituintes nos minerais da farinha no clínquer (ROCHA, LINS e SANTO, 2011; SOUZA et. al., 2015). Após sair do forno o clínquer é resfriado e moído junto com os aditivos, que irão dar as propriedades finais ao cimento. Finalmente, o cimento pode

ser embalado em sacos ou transferido para silos para posteriormente ser transportado.

O processo apresentado considerou a produção por via seca. Além disso, podem ser vistos plantas de produção do cimento que possuem somente o sistema de pré-aquecimento ou o sistema de pré-aquecimento com o pré-calcinador antes do forno.

3.3 Energia térmica na indústria do cimento

A indústria do cimento é considerada energointensiva, isto é, requer grandes quantias de energia térmica e elétrica para a fabricação do cimento. No tema em questão, a energia de interesse é a energia térmica.

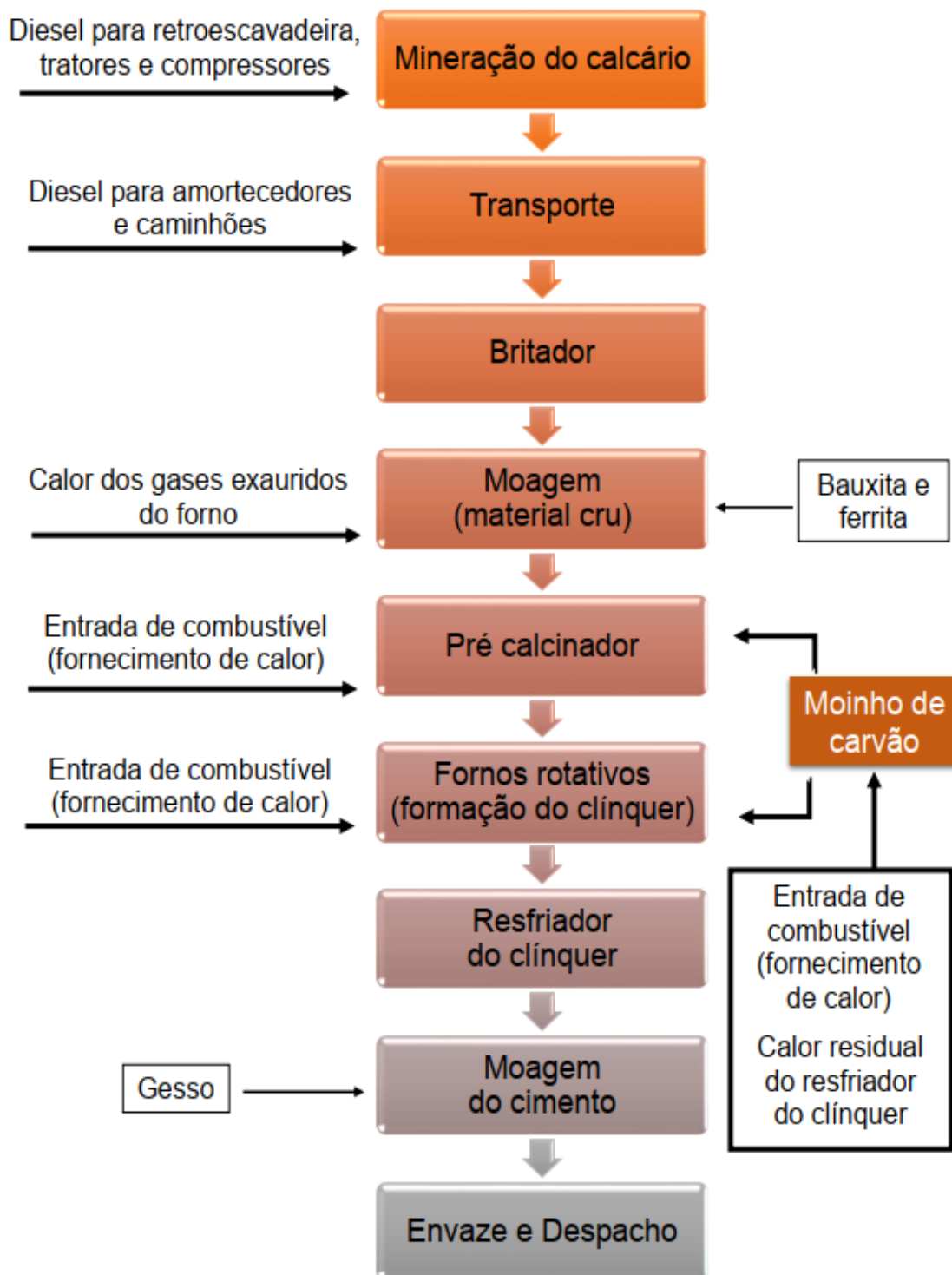
O consumo de energia térmica na indústria do cimento é dado através do aproveitamento energético dos combustíveis. Os combustíveis são utilizados em algumas etapas do processo de produção do cimento, como fonte de calor, além disso o calor residual gerado em algumas etapas pode ser reaproveitado. A figura 6, mostra de forma simplificada em quais etapas a energia térmica é demandada.

Segundo Maringolo (2001) *apud*. THERMIE PROGRAMME (1996), o consumo de energia térmica na indústria do cimento, em 1995, correspondia a 90% do total da energia utilizada. No ano 2021, segundo a EPE (2022), o uso da energia térmica corresponde a 86,6% da energia consumida pela indústria.

Uma das etapas que mais requer o uso da energia térmica, é a etapa de formação do clínquer. Segundo Madlool *et al.* (2011), a realização deste processo requer de 93% a 99% do consumo total dos combustíveis². Segundo a EPE (2020) em 2019, o consumo de energia térmica específico para a produção do clínquer foi de 83,3%, como mostra a figura 7.

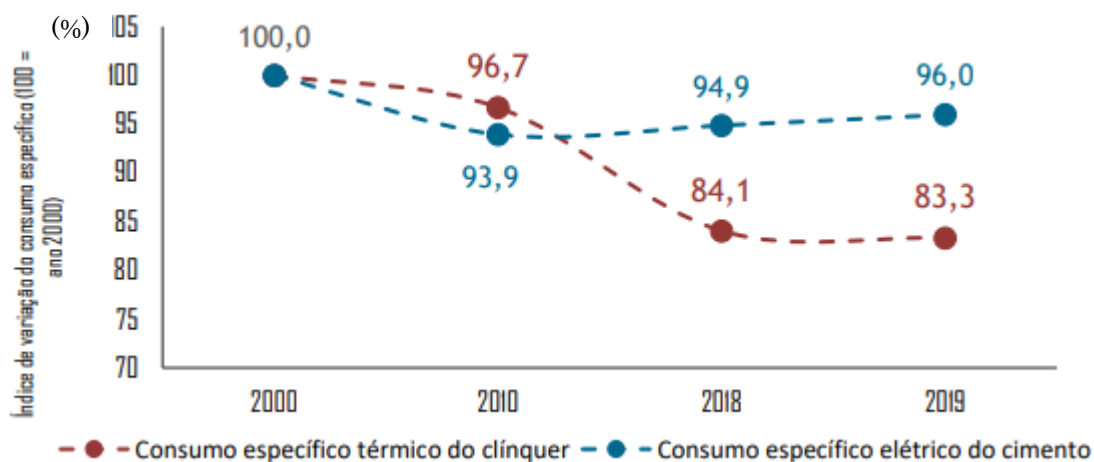
² Considerando países industrializados, como cita o autor em 2011.

Figura 6 - Fluxograma do uso da energia térmica na indústria do cimento



Fonte: Adaptado de MADLOOL *et al.*, 2011.

Figura 7 - Consumo específico de energia na indústria do cimento no Brasil (2000-2019)



Fonte: EPE, 2020.

Os dados expressos na figura 7, apresentam uma comparação com os dados de 2000, onde nesta data inicial é considerado como 100% o consumo de energia térmica, ou seja, o total declarado no ano.

Ao longo dos anos, de acordo com a figura 7, é observada uma redução no consumo de energia térmica na produção do clínquer de 16,7%, mostrando ganhos na eficiência energética (EPE, 2020).

3.4 Resíduos industriais e combustíveis alternativos

Como relatado, é necessário fornecer energia para atingir as altas temperaturas requeridas em algumas etapas na produção do cimento. Para isso, os fornos rotativos clínquer são alimentados com certas quantias e volumes de combustíveis (ROCHA, LINS e SANTO, 2011). Os combustíveis utilizados para alimentar os fornos rotativos clínquer são chamados de combustíveis primários e combustíveis secundários.

Os combustíveis primários são aqueles tradicionalmente conhecidos, como o carvão mineral, óleo combustível e gás natural. Tais fontes são advindas de recursos não renováveis, possuem alto potencial poluidor e custos elevados (TOSTA, SOUZA e SILVA, 2007).

Já os combustíveis secundários são os alternativos. Aqueles que passaram a serem utilizados na produção do clínquer durante uma necessidade especial na década de 70, com as crises do petróleo e escassez de óleo combustível (SANTI,

2003). Além disso, segundo a ABCP (2019), os combustíveis alternativos são utilizados por auxiliar na redução de custos, diminuir a emissão de gases de efeito estufa, ajudar a preservar os recursos naturais, diminuir passivos ambientais e aumentar a vida útil de aterros. É importante lembrar que estas são premissas e considerações feitas pelas associações e indústrias do cimento.

Alguns exemplos de resíduos utilizados como combustíveis alternativos podem ser vistos na tabela 1, que retrata os resíduos que eram conhecidos e utilizados até o ano de 1993 e na tabela 2, resíduos de conhecimento até o ano de 2018.

É visto que os resíduos mais utilizados são de origem industrial e que devido aos processos produtivos facilmente os resíduos industriais podem ser classificados como resíduos perigosos, conhecidos como resíduos classe I.

Para que um resíduo seja classificado como perigoso este deve apresentar em certos níveis algumas particularidades como inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, reatividade e patogenicidade, conforme descreve a NBR 10.004/2004 que dispõe sobre a classificação dos resíduos sólidos.

Inicialmente tendo as tabelas 1 e 2 como referência e comparando-as com os anexos A e B da NBR 10.004/2004 que descrevem sobre alguns resíduos, seus constituintes perigosos e suas características de periculosidade, é visto que resíduos como os petroquímicos, solventes, químicos, óleos usados, lama de processos químicos são classificados como tóxicos pela norma. Para verificar os reais níveis de toxicidade destes resíduos é necessário realizar análises laboratoriais para cada gerador.

Tabela 1 - Resíduos utilizados para o coprocessamento em 1993

SÓLIDO	LÍQUIDOS	GASOSOS
Resíduos de papel ou de papelão	Resina ácida	Gás de aterro sanitário
Coque de petróleo	Óleo combustível usado	Gás de pirólise
Pó de grafite	Lama com óleo	
Carvão de madeira (vegetal)	Hidrocarbonetos poliaromáticos	
Resíduos de borracha	Aromáticos Clorados	
Pneus velhos	Outros compostos cíclicos aromáticos	
Caixa de bateria	Alcatrão	
Terra de branqueamento	Resíduos de Petroquímica	
Óleo de ardósia (óleo de corte)	Resíduos de indústrias de tintas (resíduo de laca)	
Turfa	Resíduos químicos	
Madeira (apara e casca de madeira)	Resíduos de solventes	
Casca de arroz	Resíduos de destilação	
Caroço de azeitona	Suspensão de ceras	
Casca de coco	Lama/borra de asfalto	
Lixo doméstico		
Sucata		
Lodo de esgoto		
Folhas de polietileno		
Folhas de Alu-PE		
Restos de fraldas		
Resto de tapete		
Papel fotográfico		
Bentonita ativa		
Combustível proveniente do lixo (BRAM)		
Areias com óleo		

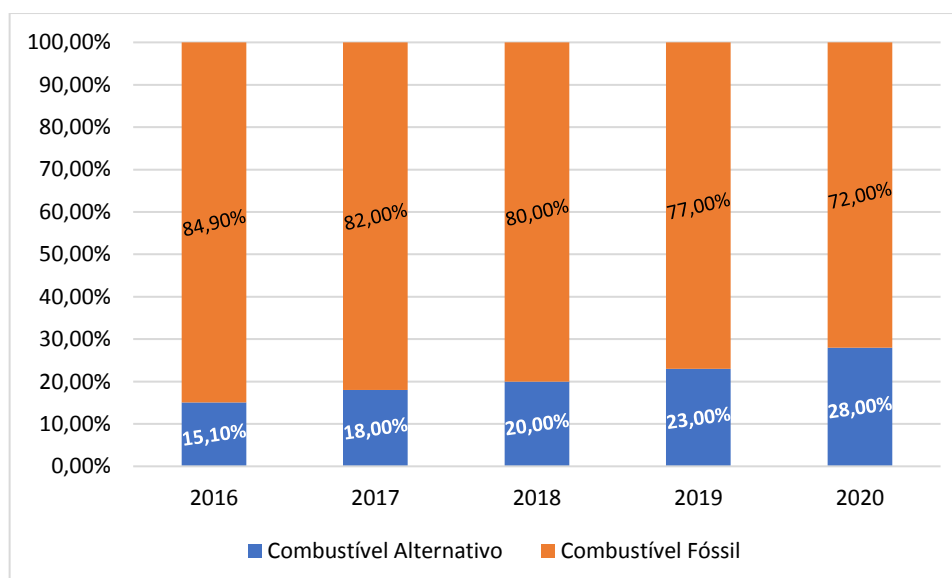
Fonte: SANTOS, 2015 *apud*. LIEBL e GERGER, 1993.

Tabela 2 - Resíduos utilizados para o coprocessamento em 2018

Solventes, resíduos oleosos e resíduos têxteis
Óleos usados (de carro e fábricas)
Pneus usados e resíduos de picagem de veículos
Graxas, lamas de processos químicos e de destilação
Resíduos de empacotamento e de borracha
Resíduos plásticos, de serragem e de papel
Lama de esgoto, ossos de animais e grãos vencidos
Resíduos do agronegócio
Combustíveis derivados de resíduos urbanos

Fonte: ABCP, 2019.

Segundo Maringolo (2001) a substituição dos combustíveis fósseis pelos combustíveis alternativos naquela época (1997-2000) considerando a indústria estudada em sua pesquisa tinha a capacidade de alcançar até 30% de substituição com os combustíveis alternativos, sendo que efetivamente a indústria alcançava em média 10% da substituição. O valor máximo alcançado por esta indústria foi de 18%. A figura 8, traz uma versão mais atualizada sobre a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos.

Figura 8 - Evolução da substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, no Brasil (2016-2020)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022. Dados da ABCP (2017-2021).

Para a constituição dos combustíveis alternativos estes são considerados basicamente em três categorias moinha de carvão vegetal, combustíveis de resíduos de biomassa e combustíveis alternativos (ABCP, 2017-2021):

- 2016: Moinha de carvão vegetal (3,8%), combustíveis de resíduos de biomassa (0,5%) e resíduos industriais e outros (10,8%).
- 2017: Moinha de carvão vegetal (6%), combustíveis de resíduos de biomassa (2%) e combustíveis fósseis alternativos³ (10%).
- 2018: Moinha de carvão vegetal (5%), combustíveis de resíduos de biomassa (3%) e combustíveis fósseis alternativos (12%).
- 2019: Combustíveis de biomassa (7%), combustíveis de resíduos de biomassa (4%) e combustíveis fósseis alternativos (12%).
- 2020: Combustíveis de biomassa (13%), e combustíveis alternativos (15%).

Na figura 8, duas mudanças são nítidas: aumento no uso dos combustíveis alternativos e conseqüentemente, a redução no uso de combustíveis fósseis. Como já era de interesse da indústria.

Comparado com o que relatou Maringolo (2001), somente em 2018 é que a marca de 18% da substituição térmica por combustíveis alternativos ocorreu, considerando o cenário brasileiro declarado. Contudo, considerando a média informada de 10%, o período analisado na figura 8, supera esta substituição.

Segundo o SNIC (2020^a), entre os anos de 2016 e 2020, o crescimento do uso de combustíveis alternativos foi de 12,9%⁴. Considerando o período de 2000 a 2019, o crescimento foi de 22% (SNIC, 2020^a apud GCCA).

Em 2019, foi publicado um estudo chamado de *Roadmap* tecnológico do cimento para o Brasil (SNIC, 2019). De modo geral, o documento mapeia o atual cenário e as tendências para a indústria do cimento no Brasil e propõe alternativas

³ Como está escrito no panorama. Contudo, acredito que se refere à combustíveis alternativos aos fósseis.

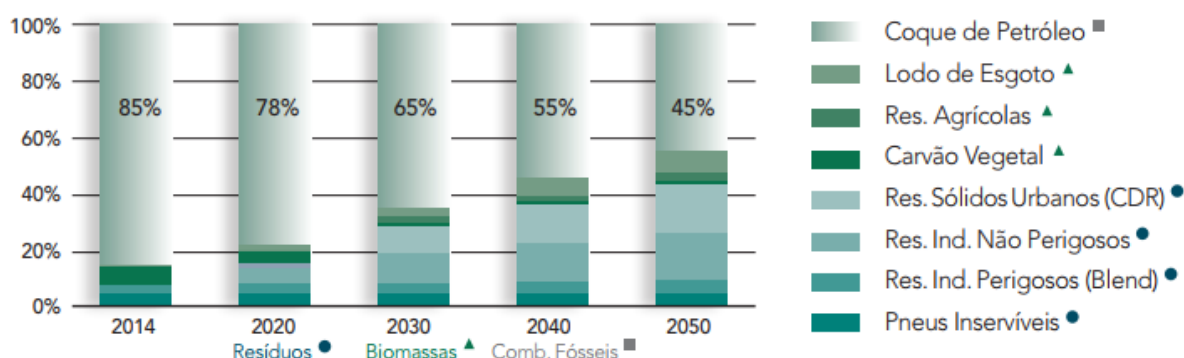
⁴ “No período de 2000 a 2019, a indústria conseguiu aumentar a participação dos combustíveis alternativos em sua matriz energética de 9% para 31% (SNIC,2020^a)”

técnicas para redução de CO₂⁵, além de realizar a análise de projeções para o setor e propor considerações diante o cenário levantado apresentando suas barreiras.

Uma das projeções realizadas no estudo, pela IEA – *International Energy Agency* (SNIC, 2019), estimou a utilização dos combustíveis alternativos de 2020 a 2050, como mostra a figura 9.

A projeção realizada para o ano de 2020, figura 9, estimou que aproximadamente 22% dos combustíveis utilizados na produção do cimento seriam de combustíveis alternativos (SNIC, 2019). Comparando esta informação com os dados da figura 8, é constatado que a utilização dos combustíveis alternativos na produção do clínquer ultrapassou o esperado, chegando a 28% do total em 2020.

Figura 9 - Projeção do uso de combustíveis alternativos no Brasil (2020-2050)



Fonte: SNIC, 2019 *apud*. IEA. Modelagem realizada pela IEA.

De acordo com a projeção, no ano de 2050 é esperado que os combustíveis alternativos representem 55% do total de combustíveis utilizados na produção do clínquer. Em consequência disso, é esperada a redução no uso de combustíveis fósseis, emissão de CO₂, redução nos custos com energia térmica e ganhos na eficiência energética.

No primeiro panorama do coprocessamento publicado pela ABCP (2015) no ano de 2014, os combustíveis alternativos apresentavam a seguinte distribuição⁶:

⁵ O documento cita sobre emissões diretas e totais.

⁶ Incluídos apenas os resíduos de interesse da pesquisa, isto é, o *blend* e resíduos que podem ser utilizados para formulação do *blend*. Além disso, o gráfico da ABCP em análise, trata apenas do combustível alternativo, sendo uma relação entre os próprios.

resíduos industriais misturados 13%, solventes 2%, *blend* 9% e 2%, óleo usado 6% e plástico 17%. Representando 49% dos combustíveis alternativos.

No ano de 2015 (ABCP, 2016), os dados apresentados pela ABCP foram mais específicos: 41% dos *blends*, 6% de óleo usado e 1% de borrachas diversas. Visto as considerações feitas, a substituição foi de 47%.

Para o ano de 2016 (ABCP, 2017) é visto que os resíduos alternativos utilizados na substituição do combustível fóssil foram representados por 39% dos *blends* e 5% de óleo usado, sendo a substituição de 44%.

Em 2017, segundo ABCP (2019), a substituição contou com 34% dos *blends*. Este foi menor valor observado, isto, devido ao uso de pneus como substituto que representou 60%.

Já em 2018, os *blends* representaram 36% dos combustíveis alternativos e o óleo usado 2% (ABCP, 2020^a). O total para o ano de 2018 é de 38%.

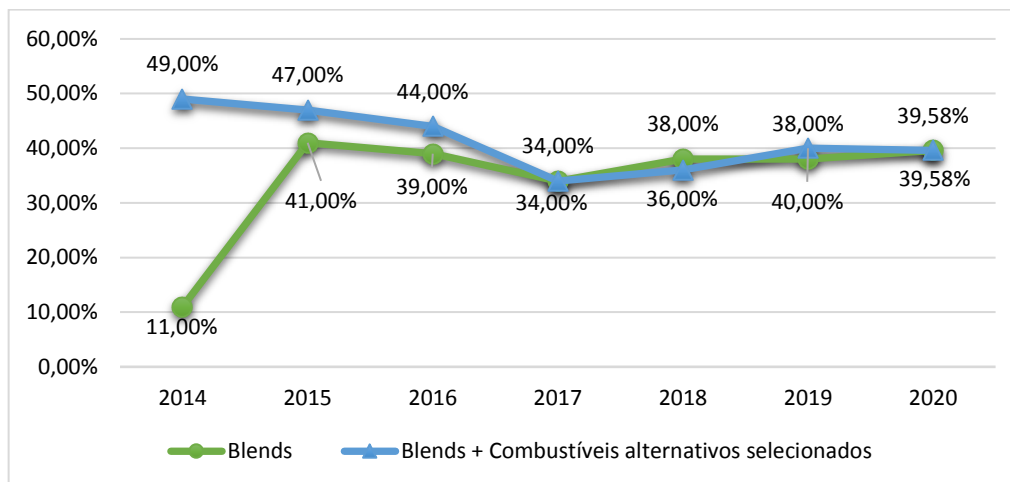
Conforme declarado para o ano de 2019, os *blends* representaram 38% dos substitutos e o óleo usado 2% (ABCP, 2020^b). Neste caso, 40% dos resíduos substitutos.

No ano de 2020, os *blends* constituíram 39,58% dos combustíveis alternativos. Nesta análise a ABCP, citou um outro tipo de combustível, o CDRU – Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos, que representou 2,75%⁷ (ABCP, 2021). Entretanto, nesta pesquisa estão sendo considerados apenas o *blend* e os resíduos industriais citados anteriormente.

Com isso, a figura 10 mostra a evolução da utilização dos *blends* e dos combustíveis alternativos selecionados somados aos *blends*, ao decorrer de 6 anos.

⁷ Este valor não está incluso nos 39,58%. É citado separadamente.

Figura 10 - Uso dos *blends* e dos combustíveis alternativos selecionados (2014-2020) no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022. Dados da ABCP (2015-2021).

O uso dos *blends* alcançou entre 34% e 41% dos resíduos utilizados como combustível alternativo entre os anos de 2015 e 2020. Quando somado a outros combustíveis alternativos selecionados que podem compor o *blend*, alcançou de 34% a 41%.

É observado que ao decorrer dos anos, de acordo com as considerações feitas, há uma aproximação nos valores apresentados na figura 10. Esta aproximação pode estar relacionada com a incorporação dos resíduos que antes apareciam separados, como é detalhado anteriormente, e passaram a ser inclusos na produção dos *blends*.

Devido a questões técnicas, para serem utilizados como combustível, os resíduos necessitam ser preparados previamente. A técnica de alimentação do forno rotativo com resíduos como combustível alternativo é conhecido como coprocessamento.

De acordo com a resolução CONAMA nº 264/1999, primeira legislação sobre o tema, o coprocessamento de resíduos era definido como:

“Técnica de utilização de resíduos sólidos industriais a partir do processamento desses como substituto parcial de matéria-prima e / ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento (BRASIL, 1999).”

Por sua vez, segundo a ABCP (2019), o coprocessamento é definido como:

“Tecnologia de destruição sustentável de resíduos de outros ramos industriais, do agronegócio e urbanos, em fornos de cimento que não gera novos resíduos e contribui para a preservação de recursos naturais, por substituir matérias primas e combustíveis tradicionais no processo de fabricação do cimento (ABCP, 2019).”

Ressalta-se que o termo “destruição sustentável” pode ser visto com certo receio, uma vez que a combustão de determinados resíduos pode gerar compostos tóxicos e poluentes.

Além disso, é dito que o coprocessamento não gera novos resíduos, entretanto as combustões dos resíduos nos fornos rotativos geram cinzas, onde estas são incorporadas no próprio clínquer produzido e não estão isentas de conter ou emitir algum tipo de substância tóxica ao meio ambiente, a população, aos trabalhadores (Santi e Sevá Filho, 2004).

Em 2020 foi publicado uma nova resolução, a CONAMA nº 499/2020 revogando a anterior. A definição sobre o coprocessamento apresentada na nova resolução é semelhante a definição da ABCP (2019):

“destinação final ambientalmente adequada que envolve o processamento de resíduos sólidos como substituto parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento (BRASIL, 2020).”

Conforme descrito por Santi (2003), na época o uso dos combustíveis alternativos na indústria do cimento, era considerado um ganho ambiental. Além disso, já era percebido uma futura mudança na matriz energética para indústria do cimento, contudo não constava no planejamento energético.

No Brasil, o uso de resíduos como combustível alternativo teve início somente na década de 90 (MARINGOLO, 2001).

De modo a verificar a evolução do coprocessamento no Brasil, a figura 11 apresenta este cenário, considerando o período de 2000 a 2020 (ABCP, 2021).

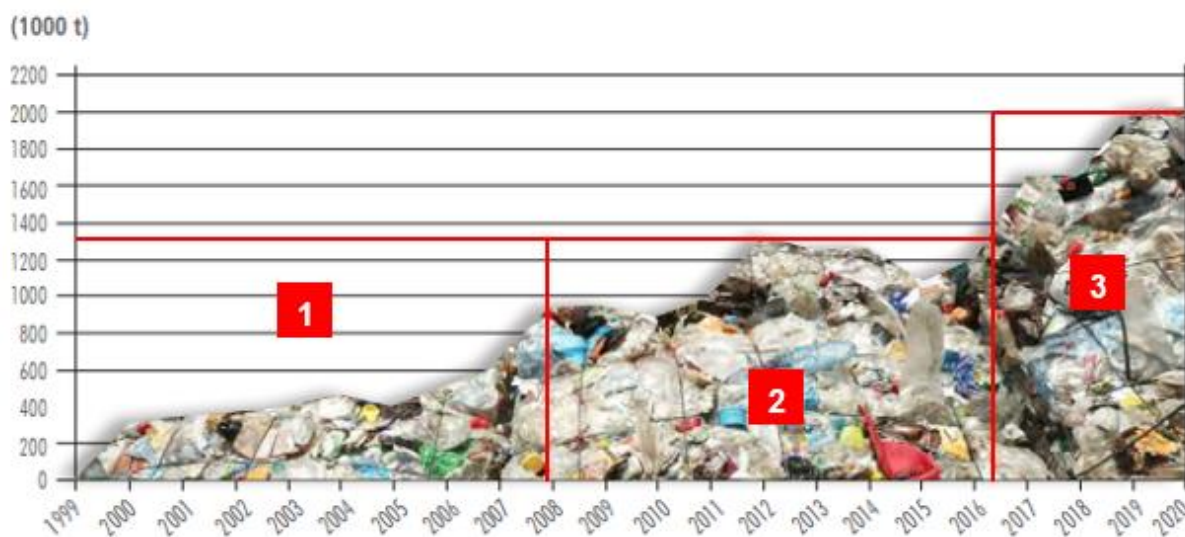
Observa-se que a figura 11 apresenta basicamente 3 regiões: a primeira de 2000 até o fim de 2007, onde se tem o início dos dados da técnica no país, de modo geral, e é visto um tímido crescimento de 2005 a 2008; para segunda região, do início de 2008 até meados de 2016, pode-se dizer que a técnica se dissipou e seguiu ganhando forças; a terceira região, após meados de 2016 até 2020, é onde a técnica

apresenta boa consolidação no Brasil e é visto o maior crescimento em relação às demais regiões da figura. Onde, destacado pela ABCP (2021) que no ano de 2020, atingiu a maior marca desde o início do emprego da técnica, 2.018 milhões de toneladas de resíduos coprocessados. Desta quantia, 92,42% referem-se aos combustíveis alternativos e a outra parcela aos resíduos que são utilizados como substitutos parciais da matéria-prima.

A figura 11 sobre a evolução do coprocessamento de resíduos no Brasil, contempla o coprocessamento em duas vertentes, isto é, considera os resíduos utilizados como combustível alternativo e os resíduos que são substitutos parciais da matéria-prima.

Conforme citado anteriormente e descrito nas definições sobre o coprocessamento, alguns resíduos podem ser utilizados como substituto parcial da matéria prima desde que contenham certas quantidades dos constituintes da matéria-prima do cimento. Exemplo: resíduos de gesso, escória, areia de fundição, solos contaminados, lamas siderúrgicas, entre outros.

Figura 11 - Evolução do coprocessamento de resíduos no Brasil (2000-2020)



Fonte: Adaptado de ABCP, 2021.

3.5 Legislação

As indústrias cimenteiras bem como as unidades que produzem o *blend*, também conhecidas pela sigla UMPCR que significa “Unidade de Mistura e Pré-

condicionamento de Resíduos” devem atender a legislação a nível federal e a nível estadual, quando houver.

Atualmente, a legislação de âmbito federal vigente para o coprocessamento de resíduos é a CONAMA n° 499 de outubro de 2020 (BRASIL, 2020) que substituiu a antiga legislação, a saber, CONAMA n° 264 de agosto de 1999 (BRASIL, 1999), após mais de vinte anos em vigor. Para discutir as principais modificações realizadas entre as resoluções, de acordo com os interesses desta pesquisa, o *item 3.5.2 CONAMA n° 264/1999 vs. CONAMA n° 499/2020* é dedicado para esta finalidade.

No âmbito estadual, a legislação encontrada refere-se aos seguintes estados: Minas Gerais, sendo a deliberação normativa COPAM n° 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010), o estado de São Paulo, sendo a norma técnica N P4.263 (CETESB, 2003), o estado do Rio de Janeiro, sendo a Instrução Técnica - IT-1315.R-0 (INEA, 1993^a) e a diretriz 1314.R-0 (INEA, 1993^b), o estado do Rio Grande do Sul, sendo a resolução n° 02/2000 (CONSEMA, 2000) e para o estado do Paraná, a resolução n° 76/09 (CEMA, 2009). Para a legislação do estado de Minas Gerais, o *item 3.5.3 COPAM n°154/2010* trata exclusivamente sobre as particularidades da resolução que são de interesse desta pesquisa, visto que a empresa A está localizada no estado.

A fim de averiguar se tais resoluções e normas incluem importantes conceitos ambientais para o coprocessamento e as Unidades de Mistura e Pré-condicionamento de Resíduos, alguns questionamentos foram feitos e estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 - Informações sobre as legislações estaduais no Brasil

Estado	Referência	Exclui resíduos específicos do licenciamento?	Exige análise dos resíduos recebidos?	Determina valores mínimos para algum parâmetro dos resíduos recebidos?	Trata sobre as unidades de mistura?	Exige poder calorífico mínimo?
Minas Gerais	Resolução COPAM nº 154/2010	Não	Sim	Sim	Sim	PCI, sendo > 2.000 kcal/kg
São Paulo	Norma técnica CETESB N P4.263	Sim	Sim	Não	Sim	PCI, sendo > 2.775 kcal/kg
Rio de Janeiro	INEA - Diretriz 1314.R-0	Não	Não	Não	Não	Não
	INEA - Instrução Técnica - IT-1315.R-0	Não	Sim	Não	Não	Não
Rio Grande do Sul	Resolução CONSEMA nº 02/2000	Sim	Sim	Não	Sim	PCI, sendo > 2.700 kcal/kg
Paraná	Resolução CEMA nº 76/09	Não	Sim	Sim	Sim	PCS, sendo > 1.000 kcal/kg

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De modo geral, o poder calorífico inferior (PCI) mínimo aceito nos diferentes estados é similar. Quanto ao estado do Rio Grande do Sul, este é o único, segundo a tabela 3, que considera o poder calorífico superior (PCS). É visto também que em alguns estados é permitido a utilização de resíduos com poder calorífico menor do que declarado na legislação, desde que seja comprovado a necessidade e liberado pelo órgão responsável. Para o estado do Rio de Janeiro não foi encontrado valores declarados na legislação estadual.

Tendo em consideração a exclusão de resíduos específicos do licenciamento, a norma técnica da CETESB e a resolução CONSEMA são as únicas das analisadas que desconsideram alguns resíduos, tais como resíduos vegetais provenientes de atividades agrícolas e da indústria de transformação de produtos alimentícios, coque de petróleo, materiais têxteis não perigosos, por exemplo (CETESB, 2003).

Para a análise dos resíduos recebidos, é visto que somente na Diretriz 1314.R-0, do Rio de Janeiro, aparece como não exigido. Isto ocorreu, pois, a parte que corresponde aos requisitos para o licenciamento, está descrita na instrução técnica - 1315.R-0 (INEA, 1993^b).

Conforme descrito na tabela 3, somente a legislação referente aos estados de Minas Gerais e Paraná determinam valores máximos para alguns parâmetros dos resíduos quanto ao recebimento, como o teor de metais (MG e PR) e os PCB's -

bifenilas policloradas (MG). Contudo, isto não significa a ausência no controle de importantes parâmetros ambientais. Na verdade, a maioria das normas e resoluções apresentam valores máximos para emissão de alguns compostos e elementos, ou seja, após a combustão.

Quanto às exigências para as unidades de mistura, somente a legislação do estado do Rio de Janeiro não faz referência.

Passando para a esfera real, a preocupação quanto a presença de metais e demais compostos tóxicos nos resíduos, é devido a emissão destes compostos através da queima nos fornos clínquer. Outra questão é que após a combustão, as cinzas restantes podem ser incorporadas no clínquer. Com isso, devido a possível presença de alguns compostos e metais, danos podem ser causados à saúde humana, a comunidade vizinha à fábrica, aos trabalhadores e ao meio ambiente, devido à toxicidade, fácil volatilidade e as emissões atmosféricas que são realizadas na chaminé do sistema de despoejamento para o ambiente vizinho (MALARD, 2016) e no contato dentro da fábrica durante a produção.

Devido ao fato apresentado, a análise dos metais e demais compostos nos resíduos se torna necessária tanto nas unidades de mistura quanto nas indústrias cimenteiras, principalmente por questões ocupacionais, pela população vizinha às indústrias e pelo meio ambiente.

3.5.1 Lei nº12.305/2010

A PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos, que é regulamentada pela Lei nº12.305/2010 de âmbito federal, estipula em suas diretrizes princípios e objetivos quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos, englobando a responsabilidade dos respectivos geradores e do poder público. Tais tratativas discorrem sobre a destinação ambientalmente adequada, desenvolvimento sustentável, incentivo à indústria da reciclagem, reconhecimento do resíduo sólido como *“reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania”* e gestão integrada de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

No que tange ao coprocessamento, além destes citados acima, está incluso dentro dos objetivos da lei, o seguinte trecho: *“incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos*

produtivos e ao **reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético** (BRASIL, 2010).”

Além disso, o artigo 9º, inciso 1º, trata sobre a utilização de tecnologias que visam a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que sua viabilidade técnica e ambiental [...] seja comprovada (BRASIL, 2010). Vale ressaltar que os resíduos sólidos urbanos não fazem parte do escopo do trabalho, entretanto, neste momento é importante demonstrar que outros tipos de resíduos, também podem ser reaproveitados energeticamente, mostrando o alcance do coprocessamento.

3.5.2 CONAMA n° 264/1999 vs. CONAMA n° 499/2020

Durante pouco mais de vinte anos, o licenciamento das atividades de coprocessamento de resíduos em fornos clínquer foram regidos pela CONAMA n° 264/1999 (BRASIL, 1999). Em outubro de 2020, esta resolução foi revogada, sendo substituída pela CONAMA n°499/2020 (BRASIL, 2020), apresentando modificações nas atividades do coprocessamento.

De acordo com essa premissa, serão abordadas as principais mudanças entre as resoluções, a fim de entender o que de fato mudou e de qual forma essas mudanças favorecem o coprocessamento.

Uma das primeiras mudanças observadas na atual resolução é a inclusão dos resíduos de serviço de saúde, que antes não tinha nenhuma abrangência para o coprocessamento e agora inclui medicamentos, resíduos oriundos do processo produtivo de indústrias farmacêuticas e os que tenham sido submetidos a tratamento que altere suas propriedades físicas, químicas, físico-químicas ou biológicas, antes de serem coprocessados. Esta nova permissão aumenta a gama de resíduos que podem ter esta nova destinação, caso atenda a este e aos demais requisitos da resolução (BRASIL, 2020).

A atual resolução traz um novo conceito sobre resíduos que não fornecem ganho energético para a tecnologia, contudo, podem ser coprocessados desde que liberados pelo órgão competente e que apresente algum ganho ambiental, isto é:

“a redução de emissão de substâncias poluentes, gases de efeito estufa, entre outros; a eliminação ou a redução da necessidade de disposição final de resíduos; a despoluição de áreas ou cursos hídricos; do coprocessamento

se apresentar como uma tecnologia ambientalmente mais adequada e segura para a destinação final do resíduo; dentre outros (BRASIL, 2020).”

Um outro ponto relevante da resolução é a possibilidade do uso de materiais apreendidos, que podem ser utilizados desde que liberados pelo órgão competente. Entretanto, para esta destinação ocorrer é necessário estar de acordo com os interesses do órgão e de políticas públicas, visto que atualmente materiais apreendidos, além da destruição, são destinados para leilões, doações e incorporações (Receita Federal, 2021^{a, b, e, c}).

Além disso, continuam proibidos o coprocessamento de resíduos radioativos e explosivos. Além destes, a nova resolução não cita diretamente sobre agrotóxicos e organoclorados, como a antiga resolução.

É importante apontar que o aumento da gama de resíduos passíveis ao coprocessamento só se torna efetivamente benéfico, em termos de energia, quando o resíduo auxilia no ganho energético. Quando isso não ocorre, os benefícios giram exclusivamente em torno do meio ambiente, se comprovado.

Um outro fato a se destacar entre as duas resoluções é o desaparecimento da seção que tratava sobre as Unidades de Mistura e pré-condicionamento de resíduos - UMPCR, da qual não está mais incluída na nova resolução. Segundo a antiga resolução, as UMPCR tinham por obrigação determinar propriedades físico-químicas dos resíduos e registrar informações como: caracterização, limites de detecção, parâmetros analisados de resíduo e as incompatibilidades (ABCP, 2020^c).

Segundo a ABCP (2020^c), as mudanças apresentadas na nova resolução advêm do amadurecimento e conhecimento quanto às operações do coprocessamento no país, onde estas mudanças se adequaram aos conceitos de economia circular, economia de baixo carbono e uso sustentável dos recursos minerais.

Além disso, a ABCP (2020^c), acredita que a nova resolução irá estimular o uso de diversos resíduos ao coprocessamento, de maneira segura, controlada e alinhada com a PNRS e ao Programa Nacional Lixão Zero. À primeira vista a premissa apresentada parece bastante atrativa, completamente eficaz e alinhada, entretanto, deve-se considerar que vários desses fatores podem sofrer interferências e conflitos de interesses entre outras formas de destinação e disposição. Além disso, é

importante lembrar que parte da própria PNRS, não foi solucionada até os dias de hoje.

Quanto às mudanças apresentadas na nova resolução a ABCP (2020^e), menciona a modernização e agilidade no processo de licenciamento, o aumento da eficiência e eficácia dos controles e da segurança jurídica e a permissão no aumento da utilização de combustíveis alternativos.

Santos *et al.* (2020) declara que embora reconheçam a necessidade de revisão da antiga resolução, não concordam com a forma em que foi realizada, discordando assim de diversos pontos. Deste modo, a nova resolução, apresentou um retrocesso, trazendo relaxamento de algumas medidas, retirando elementos na lei que salvaguardava o meio ambiente, a saúde das comunidades, trabalhadores e do planeta, reconhecendo ainda que uma nova resolução deveria aperfeiçoar e jamais suprimir ou flexibilizar a antiga.

Santos *et al.* (2020) também reconheceram a exclusão das Unidades de Mistura e Pré-Condicionamento de Resíduos e acrescentou a perda dos benefícios ambientais ao suprimir este elemento na lei, uma vez que as UMPCR são capazes de caracterizar os resíduos continuamente e poderia excluí-los de modo a eliminar os indesejáveis, de tal forma, auxiliando na diminuição de possíveis emissões poluentes e contaminação do cimento.

E disse mais:

“A eliminação dos dispositivos que regulava as Unidades de Mistura e pré-condicionamento de resíduos (também conhecidas pelo termo *blend* em inglês) significa que a nova Resolução Conama n.º 499/2020, não mais cobrirá o seu licenciamento, e que, portanto, não haverá monitoramento nem controle dessas atividades. Ao revogar do dispositivo o regramento sobre unidades de mistura e pré-condicionamento de resíduos, criou-se deliberadamente um vácuo legal no licenciamento que ameaça diretamente os trabalhadores, as comunidades. A má gestão por falta de regramento poderá causar acidentes, incêndios, explosões e macular o próprio coprocessamento, pois nenhuma outra legislação em vigor no Brasil normatiza o licenciamento ambiental dessas atividades (SANTOS *et al.*, 2020).”

É importante salientar que a nova resolução não anula a vigência de leis estaduais, ou seja, caso haja alguma norma ou resolução de âmbito estadual ou municipal sobre algum aspecto da UMPCR, esta deve ser seguida. O trecho citado acima se refere ao licenciamento.

Um outro ponto questionado por Santos *et al.* (2020), é o artigo 3º da nova resolução que permite a utilização de materiais e resíduos dados como passivo ambiental, desde que aprovado pelo órgão ambiental.

Ainda sobre resíduos que podem ser coprocessados, que tem levantado controvérsias não só por Santos *et al.* (2020), mas também por Aguiar, Matos e Esteves (2022) é a permissão para utilização de embalagens de produtos agrotóxicos.

Aguiar, Matos e Esteves (2022) realizaram um estudo comparativo avaliando a destinação das embalagens de produtos agrotóxicos, existente antes da nova resolução⁸ com o coprocessamento de resíduos, considerando a destinação das embalagens para essa tecnologia.

Este estudo demonstrou que o coprocessamento dos resíduos de embalagens de agrotóxicos apresentaria maiores prejuízos ao meio ambiente, no tocante a mudanças climáticas, ecotoxicidade marinha e da água, formação de material particulado, oxidantes fotoquímicos e toxicidade humana, considerando o CL. Sobretudo, tendo maiores impactos no município de Cantagalo – RJ e na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, região que concentra a grande parte das cimenteiras licenciadas para o coprocessamento no país.

Diante aos resultados, Aguiar, Matos e Esteves (2022) relativamente como Santos *et al.* (2020), reconheceram também que a nova resolução é prejudicial ao desenvolvimento sustentável, referente a análise feita e acrescenta que este feito apresenta retrocessos ambientais não só para o coprocessamento propriamente dito, mas também aos setores agrícolas e cimenteiros.

A nova resolução apresenta ainda mais um elemento que não é bem-visto quando se trata do licenciamento de resíduos para o coprocessamento, que é a exclusão dos resíduos que podem ser coprocessados, mas que não farão parte do processo de licenciamento. Tais resíduos estão listados na tabela 4.

⁸ “A partir do ano de 2002, foi criado o Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias que iniciou a operacionalização deste sistema de coleta e reprocessamento, chamado de Campo Limpo (CL) (AGUIAR, MATOS E ESTEVES, 2022).”

Tabela 4 - Combustíveis e matérias-primas alternativos não sujeitos à aplicação da resolução CONAMA nº499/2020

Casca de arroz.
Serragem de madeira não tratada.
Resíduos vegetais provenientes de atividade agrícola, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, trigo e similares.
Resíduos vegetais provenientes da indústria de transformação de produtos alimentícios, como cascas, bagaços de cítricos, cítricos utilizados para extração de óleos essenciais etc.
Resíduos vegetais fibrosos provenientes da produção de pasta virgem e de papel.
Resíduos de madeira, com exceção dos resíduos de madeira que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes ou revestimento.
Sucatas de metais ferrosos e não-ferrosos, como pós, carepas, cavacos, limalhas etc., classificadas como resíduos não perigosos pela NBR 10004 da ABNT, ou norma que venha a substituí-la.
Resíduos de materiais têxteis classificados como resíduos não perigosos pela NBR 10004 da ABNT, ou norma que venha a substituí-la.
Resíduos de obras de construção civil e demolição.
Resíduos de refratários, vidros, material têxtil, como mangas filtrantes e estopas, EPIs, borracha, cabos elétricos, plásticos, papel e papelão, óleos e graxas, com exceção daqueles passíveis de rerrefino, conforme Resolução CONAMA nº 362/2005 e outros gerados na própria unidade coprocessadora, passíveis de coprocessamento.
Resíduos provenientes do processo de triagem das cooperativas e associações de catadores e triadores de materiais recicláveis submetidos a alguma forma de separação prévia de resíduos recicláveis, e que atendam aos requisitos constantes do forno já licenciado para coprocessamento de CDR.

Fonte: Brasil, 2020.

Sendo um resíduo tratado como perigoso ou não, ele deve ser incluído no processo de licenciamento, uma vez que este é resultado de outras atividades industriais e pode conter, por motivos desconhecidos ou não, substâncias perigosas.

Além disso, como relatado por Santos *et al.* (2020), não licenciar os resíduos relatados na tabela 4 é dar passe livre, sem obrigação de análise e testes completos, reforçando o risco ao meio ambiente.

Diante os apontamentos negativos sobre a nova resolução, o secretário de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente, André França, rebateu:

“Não é assim, a empresa pode queimar o que quiser. São vários passos que a empresa deve seguir para conseguir a autorização de produtos de outras

naturezas. O processo é muito bem controlado. Inclusive a nova norma adiciona procedimentos mais claros e objetivos [...] (ALENCAR, 2020).”

É fato que, para utilização de qualquer resíduo é necessário apresentar todas as documentações para o órgão competente, entretanto, apenas o fato de resíduos que antes eram proibidos serem incluídos e pré-aprovado pelo órgão ambiental na resolução, basicamente se apresenta como uma liberação destes para o coprocessamento.

Para finalizar as discussões quanto às mudanças, segue uma observação apontada por Maringolo (2001) quanto a visão dos órgãos ambientais da época sobre o coprocessamento, visto às legislações vigentes no ano de 2001, para que sirva de reflexão vinte e um anos após relatada e se compare com o atual cenário:

“Ao exigir que o co-processamento agregue valor ao resíduo, pretendem assegurar que fornos licenciados para produzir cimento não utilizem resíduos perigosos de baixo poder calorífico a pretexto de recuperação energética quando, de fato, estariam apenas destruindo-os. Para as agências ambientais, configuraria um papel para o forno rotativo pura e simplesmente de incinerador (MARINGOLO, 2001).”

3.5.3 COPAM n°154/2010

Devido a análise dos resíduos utilizados na produção dos *blends* para o coprocessamento englobar uma empresa localizada no estado de Minas Gerais, é necessário abordar a legislação vigente no referido estado. Neste sentido, tanto a UMPCR quanto a indústria cimenteira localizada no estado, devem atender aos requisitos da deliberação normativa COPAM n° 154/2010 que dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos clínquer para o estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2010).

Segundo a COPAM n°154/2010, para que os resíduos possam ser coprocessados, este deve apresentar o PCI - Poder Calorífico Inferior mínimo de 2.000 kcal/kg. A norma também é abrangente e específica para resíduos domiciliares, desde que pré-tratados ou tratados, sendo seu valor de PCI mínimo de 1.500 kcal/kg. Um outro ponto importante do qual a CONAMA n° 264/1999 e a CONAMA n° 499/2020 não contemplaram, entretanto, está incluso na COPAM n°154/2010 diz respeito aos teores máximos de alguns grupos de metais para a **entrada no forno**, isto é, análise antes da combustão e principalmente emissão. Os valores permitidos estão descritos

na tabela 5. As duas legislações de âmbito federal, referidas anteriormente, estabelecem valores apenas para emissão, ou seja, após a combustão nos fornos.

Tabela 5 - Teores máximos de metais no *blend* para entrada no forno, para o estado de Minas Gerais

Parâmetros	Limites
Cádmio (Cd) + Mercúrio (Hg) + Tálcio (Tl)	= 100 mg/kg sendo Hg < 10mg/kg
Arsênio (As) + Cobalto (Co) + Níquel (Ni) + Selênio (Se) + Telúrio (Te)	= 1.500 mg/kg
Antimônio (Sb) + Cromo (Cr) + Estanho (Sn) + Chumbo (Pb) + Vanádio (V)	=5.800 mg/kg 5.800 mg/kg sendo Pb 3.000 mg/kg

Fonte: Adaptado de MINAS GERAIS, 2010.

Quanto aos resíduos que não podem ser coprocessados, a COPAM nº154/2010 segue as diretrizes da legislação de âmbito federal vigente.

3.6 Estimativa do poder calorífico

O poder calorífico de um resíduo ou combustível refere-se à quantidade de energia, na forma de calor, que este material pode fornecer. O calor fornecido para o processo de combustão está principalmente relacionado com a quantidade de carbono e hidrogênio contidas no combustível que, ao se combinar com o oxigênio, libera o calor (OLADE, 2017).

Duas formas podem ser avaliadas para determinar o poder calorífico dos combustíveis, conhecidas como PCS – Poder Calorífico Superior e PCI – Poder Calorífico Inferior. O PCS leva em consideração o calor liberado pelo combustível acrescido do calor liberado pela água formada durante o processo de combustão. Em contrapartida, o PCI desconsidera o calor liberado pela água durante o processo de combustão, podendo ser entendido também como o valor líquido do calor fornecido (OLADE, 2017).

Geralmente, para determinar o poder calorífico dos resíduos é mais frequente a utilização de um calorímetro bomba. Em contrapartida, também pode-se utilizar

modelos matemáticos para esta finalidade, através de estimativas. Contudo, para realizar a estimativa é necessário conhecer ou realizar a caracterização dos resíduos para obtenção de alguns parâmetros, tais como, análise elementar, teor de cinzas, teor de umidade, percentagem de carbono e hidrogênio, entre outros parâmetros, como está descrito em Kathiravale *et al.*, 2003.

Em especial, para resíduos sólidos urbanos ou como chamado em inglês *MSW* - *Municipal Solid Waste*, conforme Kathiravale *et al.* (2003) descreveu, há a possibilidade de estimar o poder calorífico utilizando algumas constantes e a composição gravimétrica dos resíduos. Isto é possível pois, esta classificação de resíduos a sua composição é composta basicamente por resíduos de alimentos, podas de jardim, papel, vidro, madeira, borracha, plástico e têxtil.

Para esta pesquisa, não foi possível obter os parâmetros necessários para que um dos modelos fossem utilizados, devido ao sigilo das informações. Desta forma a estimativa do poder calorífico do *blend* será obtida através de uma relação entre a massa, onde está contido todo o conteúdo energético e o poder calorífico inferior de cada resíduo, conforme descrito por Corbitt (1999), seguindo as equações (1) e (2).

$$MR_i = \frac{m_i}{m_{total}} * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde,

m_i : é a massa em kg do resíduo i ;

m_{total} : é a massa total de todos os resíduos, em kg, para o mês de referência;

e o MR_i : é a massa do resíduo “ i ”, em porcentagem (%).

$$PCI_{blend} = \sum_{i=1}^n MR_i * PCI_{resíduo\ i} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde,

MR_i : é a massa do resíduo “ i ”, em porcentagem (%);

$PCI_{resíduo\ i}$: é o poder calorífico inferior do resíduo “ i ”, em kcal/kg;

e o PCI_{blend} : é a estimativa simples do poder calorífico no mês de referência, em kcal/kg.

Para esta simples relação, o $PCI_{resíduo\ i}$ será utilizado de outros geradores, conforme disponível na literatura, como mostra a tabela 6.

Alguns resíduos são muito diversos, assim impossibilitando encontrar um PCI similar em outra fonte. Nestes casos, para tais resíduos será utilizado os valores mínimos estipulados na COPAM n°154/2010 (MG) e na Norma técnica CETESB N P.4.263 (SP), respectivamente, 2.000 kcal/kg e 2.775kcal/kg.

A Norma técnica da CETESB foi escolhida por São Paulo ter o segundo maior polo industrial de cimento e apresentar valor superior ao da COPAM n°154/2010 possibilitando termos uma faixa de trabalho em que o poder calorífico inferior do *blend* pode estar contido, de acordo com esta estimativa.

O valor médio do poder calorífico inferior segundo uma dada indústria cimenteira, é de 3.544 kcal/kg (Empresa B1, 2017). Este valor será utilizado para uma comparação, entre o valor declarado pela empresa B1 e a estimativa que será calculada, conforme a equação (3).

$$Diferença_{Relativa} = \left| \left(\frac{PCI_e - \overline{PCI}_d}{\overline{PCI}_d} \right) \times 100 \right| \quad \text{Eq. (3)}$$

onde,

PCI_e : é o valor estimado, em kcal/kg;

\overline{PCI}_d : é o valor médio declarado pela empresa B1, em kcal/kg;

$Diferença_{relativa}$: é a diferença relativa modular entre o valor estimado e o declarado, em porcentagem.

4. FORMULAÇÃO DE *BLENDS*

A realização do estudo dependeu da disponibilidade das empresas que produzem o *blend*. Inicialmente, foi realizado o contato com diversas empresas no estado de Minas Gerais, onde apenas duas se disponibilizaram a fornecer os dados.

Buscando obter mais dados sobre a produção dos *blends* também foi realizado o contato com outras empresas fora do estado de Minas Gerais, porém sem sucesso. Por fim, não foi possível incluir uma das empresas do estado de Minas Gerais, visto que esta havia iniciado sua produção há pouco tempo, não tendo dados suficientes para os interesses desta pesquisa. Dado as circunstâncias o estudo foi realizado com apenas uma empresa.

4.1 Empresa A

Localizada no estado de Minas Gerais, a empresa A, atua no tratamento e disposição final de resíduos sólidos em geral. Dentre suas atividades, além da UMPCR - unidade de mistura e pré-condicionamento de resíduos para o coprocessamento, a empresa também dispõe das atividades de aterro para resíduos não perigosos classe II e perigosos classe I de origem industrial, tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos, estação de tratamento de efluentes industriais, perigosos e não perigosos, inclusive de terceiros e entre outras atividades.

4.2 Descrição do processo

Conforme os relatórios da empresa A, o processo de produção dos *blends*, ocorre como é descrito a seguir.

O primeiro procedimento antes da chegada da carga de resíduos à empresa A é avaliar se a documentação, bem como a carga de resíduos está dentro da conformidade necessária. Este processo ocorre enquanto o caminhão está na balança para realizar a pesagem da carga.

Após a avaliação dos documentos e pesagem, a análise visual da carga de resíduos é realizada pelo controle técnico da empresa, ainda para avaliar se a carga está de acordo com o esperado, isto é, se não apresenta nenhum resíduo

acondiçionado à carga que esteja fora do esperado ou em condições inapropriadas para o processamento. Sendo a avaliação positiva, a carga de resíduos segue para a o galpão onde ocorre a produção dos *blends* e uma nova conferência é realizada para verificar se o resíduo está a granel ou acondicionado/embalado, onde no segundo caso, a carga é inspecionada durante este processamento. Os resíduos inspecionados são depositados em baias previamente definidas.

Podemos entender as baias como uma espécie de fosso: são escavadas e estão abaixo do nível do solo. São utilizadas para realizar parte do processamento e mistura dos resíduos, sendo divididas em baias para a mistura, estruturação e inertização.

Os resíduos que anteriormente foram depositados as suas baias correspondentes são selecionadas para uma pré-mistura. A pré-mistura é realizada com o auxílio de pá carregadeira ou escavadeira hidráulica. Nesta etapa os resíduos são selecionados de acordo com suas características físicas e químicas.

Durante o processo, insumos para estruturação podem ainda ser incorporados aos resíduos, caso haja necessidade. No geral, o material utilizado para estruturação é incorporado aos resíduos no mesmo dia, entretanto, de acordo com as necessidades da empresa, este pode permanecer em armazenamento.

Após a pré-mistura, os resíduos seguem para a retirada de rejeitos, isto é, resíduos indesejáveis e não processáveis que porventura estão entre os processáveis, como exemplo pequenos materiais metálicos. Estes materiais indesejados são encaminhados para o aterro da própria empresa.

Por fim, os resíduos processados, misturados e peneirados, isto é, os *blends*, são dispostos na área de produtos acabados e estão prontos para o envio às cimenteiras.

5. METODOLOGIA

A análise consiste em cinco etapas que estão descritas a seguir.

5.1 Coleta de dados

Os dados foram obtidos através de um documento enviado pela empresa A. Estes dados consistem em resíduos que foram destinados à formulação de *blends* para o coprocessamento na empresa citada, no período de janeiro a dezembro de 2020.

5.2 Descrição

Os dados estavam dispostos em uma extensa planilha, a qual, foi reorganizada e redistribuída mensalmente. Foram consideradas para a análise as seguintes informações:

- data do recebimento
- tipo de resíduo
- massa do resíduo
- ramo de atividade do gerador
- estado físico
- frequência de recebimento⁹

5.3 Organização dos dados

De modo a compreender quais foram os principais resíduos utilizados na formulação de *blends* no ano de 2020, a análise mensal foi realizada, inicialmente, agrupando os resíduos.

Esta análise foi realizada através da tabela dinâmica, que reconhece somente caracteres idênticos, ou seja, agrupa apenas resíduos descritos, exatamente, com o mesmo nome. Neste sentido, resíduos que possuíam diferenças como ausência de acento, espaçamento e em alguns casos a descrição diferente, mesmo se tratando do mesmo resíduo, não eram agrupados. Exemplificando: borra da caixa de separação

⁹ Inserida pelo autor

de água e óleo, borra de *são*, borra de S.Ã.O., plástico contaminado com óleo e plástico contaminado com *oleo*, entre outros.

Feito o primeiro agrupamento, a etapa seguinte foi realizada manualmente, utilizando filtros para auxiliar na identificação das diferenças citadas anteriormente e finalmente obter os resíduos com a devida coerência.

5.4 Análise dos resíduos

Com todos os resíduos devidamente agrupados, dois critérios foram propostos, para definir através de qual deles a análise iria seguir:

- Classificando os resíduos de forma decrescente pela frequência de recebimento
- Classificando os resíduos de forma decrescente pela quantidade de massa

Essa necessidade surgiu, visto que alguns resíduos são recebidos com alta frequência, porém com baixa quantidade de massa e que outros, são recebidos com baixa frequência e alta quantidade de massa. Logo, é necessário determinar qual dos dois critérios é mais adequado para seguir a análise e que além disso, contemple uma porcentagem de massa ou frequência mais representativa em relação ao total do mês de referência.

Além disso, devem ser determinados os principais resíduos utilizados em cada mês, através dos 10 resíduos com maior massa, para que o perfil de cada cenário (mês) seja representado. Deste modo, a tabela 6 mostra de modo geral os resíduos que foram selecionados de acordo com essa classificação.

O poder calorífico inferior dos resíduos foi adicionado à tabela 6, visto que será utilizado posteriormente. Estes valores foram encontrados na literatura.

O termo “contaminado” que aparece nos resíduos descritos na tabela 6, refere-se a substâncias que são agregadas no resíduo enquanto este é gerado, podendo ser óleos, graxas, solventes, água, produto químico, tintas, verniz, entre outros.

Tabela 6 - Resultado preliminar dos 10 resíduos com maior massa no ano de 2020

Resíduo	PCI (kcal/kg)	Referência
Apara de couro e pó de couro	3.629,00	(EPE apud MIG, 2014)
Aparas de tecidos contaminados	3.478,00	
Feltro Fenólico		
Plástico contaminado	6.301,00	
Resíduos de borracha	6.780,00	(EMPRESA B1, 2017)
Borra ácida	3.591,00	
Borra oleosa	9.646,00	(LIMA, 2014)
Lodos da ETE	4.442,53	(BORGES, SELIN e MEDEIROS, 2009)
Óleo contaminado	9.600,00	(SOUZA, 2006)
Resíduo oleoso do poço redondo	2.078,00	(SANTOS; SOUZA e HOLANDA, 2002)
Borra de retífica e filtros	2.000,00 e 2.775	(MINAS GERAIS, 2010) e (CETESB, 2003)
Borras de tintas contaminadas		
Composto energetico in natura		
EPIs, estopa contaminada, filtros e mangueiras de óleo, resíduos cont. com óleo, graxa (embalagens de plástico, papelão, estopa, panos)		
Líquidos contaminados com óleo		
Não recicláveis		
Outros resíduos classe I		
Resíduo blend classe I		
Resíduos da caixa separadora de água e óleo		
Resíduo industrial		
Resíduo material contaminado com óleo e graxa		
Resíduos automotivos contaminados com óleos e graxas		
Resíduos classe IIA / IIB		
Resíduos de diversos contaminados		
Resíduos KI diversos contaminados		
Sal contaminado com hidrocarboneto		
Varredura de alimentos		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

5.5 Documentos ambientais e científicos

Em muitos casos, não é possível obter certos tipos de dados por estes serem tratados em sigilo. Neste caso, não foi possível obter alguns dados da empresa A e nem realizar as análises físico-químicas referentes aos resíduos. Entretanto, o ramo gerador do resíduo é de conhecimento, possibilitando assim, em alguns casos, encontrar em documentos ambientais, artigos científicos, dissertações e teses, algumas propriedades dos resíduos, ainda que semelhantes.

Com isso, alguns documentos ambientais referenciados no trabalho, foram extraídos do SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2021), que pertence a SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e os documentos anexados na plataforma são de acesso público. Entretanto, o nome das empresas será mantido em sigilo.

Tais documentos podem ser acessados através da aba “Acesso de Visitante”, figura 12, que posteriormente será redirecionada para a pesquisa quanto a informações sobre o empreendimento e/ou as atividades que ele exerce, figura 13.

Para melhor experiência quanto à busca, é necessário obter informações sobre o tipo de atividade desejado, consultando a Deliberação Normativa COPAM nº 217 que dispõe sobre atividades e empreendimentos para o estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2017).

Figura 12 – Página inicial do SIAM: Acesso do visitante

SEMAD Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Suporte Técnico: 155 - LigMinas

SIAM

Usuário logado: Nenhum usuário logado

Orgão:

■ Serviços Online
Mapas Online
DAE On-Line

■ Serviços IEF
Onde ser atendido
Emissão de Carteira de Pesca

■ Usuários SIAM
Login:
Senha:
Entrar

Controle de Atividades Florestais/SISMAF

■ Sites Sisema
SEMAD
FEAM
IEF
IGAM

COMUNICADO

INTEGRAÇÃO DE CADASTRO E ARRECADAÇÃO CTA E CTF FEAM/IEF/IBAMA

A partir de 1º de setembro de 2011 o Cadastro Técnico Ambiental Estadual – CTA de Minas Gerais está **integrado** ao Cadastro Técnico Federal – CTF do IBAMA. O cadastramento de **novos** usuários deverá ser feito diretamente no site do IBAMA – <http://servicos.ibama.gov.br/cogeq/>. O usuário que possui cadastro apenas no CTA de Minas Gerais deve, necessariamente, efetuar o cadastramento do seu empreendimento e das atividades desenvolvidas no sítio do IBAMA. Aqueles que possuem cadastro apenas do IBAMA já são considerados devidamente cadastrados.

Maiores informações clique aqui.

LICENCIAMENTO AMBIENTAL
DN 217/17
Deliberação Normativa 217/17

Legislação Ambiental

Certificado
CONIP
Exatidão em Informática
Aplicada aos Serviços Públicos

Acesso de Visitante

Sistema Estadual de Meio Ambiente

SIAM - SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL

Fonte: SIAM, 2021.

Figura 13 - Aba de pesquisa sobre informações dos empreendimentos

SEMAD Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável | Suporte Técnico: 155 - LigMinas | **SIAM**

usuário logado: Nenhum usuário logado | Opções

Siam - Sistema Integrado de Informação Ambiental

FOBE:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Processo Técnico:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Processo de Outorga:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
CPF/ CNPJ do Empreendedor:	<input type="text"/>	
Nome/ Razão Social do Empreendedor:	<input type="text"/>	
CPF/ CNPJ do Empreendimento:	<input type="text"/>	
Nome/ Razão Social do Empreendimento:	<input type="text"/>	
Município(s) do Empreendimento:	<input type="text"/>	<input type="button" value="..."/>
Atividade(s) do Empreendimento:	<input type="text"/>	<input type="button" value="..."/>

Escolha um critério para pesquisa

Fonte: SIAM, 2021.

6. RESULTADOS

O estudo em questão foi realizado durante o período de pandemia da COVID-19 no mundo. Especificamente no Brasil, coincidiu com o início do período letivo, final do primeiro trimestre de 2020. Este feito impactou diretamente o planejamento das atividades acadêmicas, práticas e até mesmo no contato com as empresas alvo, visto que muitos trabalhadores foram afastados de suas funções.

Além do que será mostrado nesta seção estava previsto a realização da análise elementar por ativação neutrônica, o que uniria a universidade com outro centro de pesquisa e a empresa selecionada.

Era de expectativa obter algumas amostras e determinar o poder calorífico dos *blends* enviados pela empresa selecionada, realizar a caracterização e comparar com os resultados teóricos, o que não foi possível devido ao cenário de pandemia e conseqüentemente as demandas de respostas.

6.1 Dados Brutos

Os resíduos analisados foram destinados à formulação de *blends* na empresa A no período de janeiro a dezembro de 2020. O critério utilizado considerou a massa dos resíduos em ordem decrescente e a frequência de recebimento foi considerada apenas para avaliar a utilização do resíduo no mês analisado.

Inicialmente, para compreender a análise desses resíduos, as figuras 14 e 15, apresentam a massa e a frequência de recebimento destes resíduos ao decorrer do ano de 2020.

A princípio, em relação à massa, não é observado nenhum tipo de padrão. Porém um aumento considerável é percebido nos meses de **julho** e **agosto**. Isto pode estar relacionado ao recebimento de novos resíduos ou aumento da destinação de resíduos específicos, por exemplo.

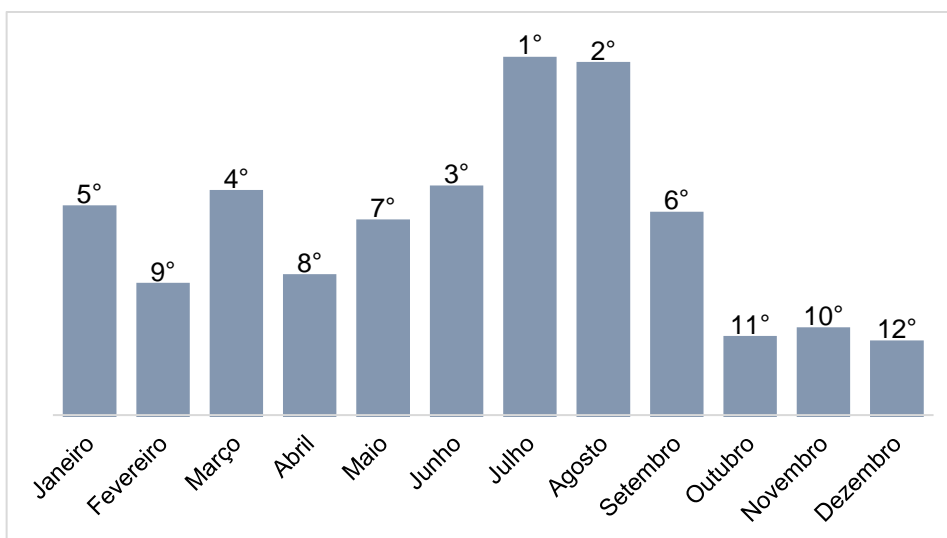
Já uma redução expressiva é observada nos meses de **outubro**, **novembro** e **dezembro**, que também podem estar relacionadas, por exemplo, com a diminuição do recebimento de resíduos específicos ou até mesmo o não recebimento de resíduos

mais frequentes. Tais suposições serão abordadas através de uma análise mais profunda, ainda neste capítulo.

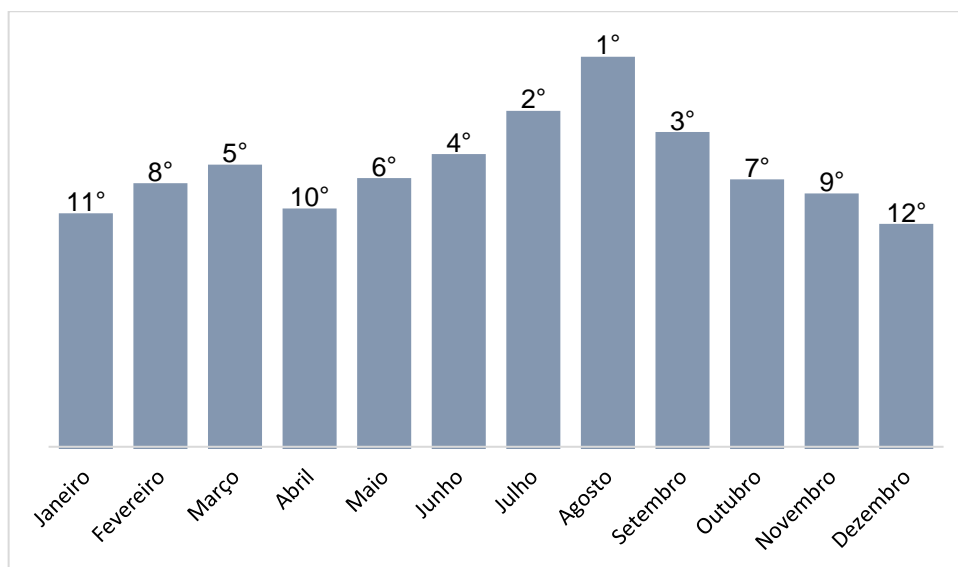
Quanto à frequência de recebimento dos resíduos, figura 15, os meses de **agosto** e **julho** estão em destaque sendo os meses de maior recebimento. Um aumento no recebimento de resíduos é percebido entre os meses de **maio** e **agosto**, seguido de uma diminuição nos meses seguintes.

Para os meses de **julho** e **agosto** há uma semelhança entre a massa e a frequência de recebimento, comparando as duas figuras. O contrário não é visto para os meses de **outubro**, **novembro** e **dezembro**. Apontar essas observações é importante ao comparar a massa com a frequência de recebimento, no sentido de demonstrar que nem sempre uma alta frequência de recebimento, irá apresentar ou acompanhar um alto valor de massa naquele mês e vice-versa.

Figura 14 – Ranking da massa dos resíduos recebidos na empresa A no ano de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 15 – Ranking da frequência de recebimento dos resíduos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As figuras 14 e 15 foram representadas de forma qualitativa devido ao sigilo das informações. Ainda que fossem apresentadas as informações dimensionais, ou seja, tonelada ou quilo para a massa e quantidade de carga em unidade para a frequência, a relação da altura das barras seria relativamente as mesmas.

6.2 Análise mensal: Cenários

Visando estimar o poder calorífico do *blend* produzido, a análise mensal foi realizada de modo a apresentar quais foram os 10 resíduos mais representativos, o estado físico e os maiores geradores, para assim, fazer as observações cabíveis. Com isso, foi determinado que em cada mês seriam avaliados os 10 resíduos com maior massa.

Deste modo, a tabela 7 apresenta a porcentagem dos 10 resíduos com maior massa em cada mês.

Tabela 7 - Porcentagem dos 10 resíduos com maior massa de janeiro a dezembro de 2020

Mês	Massa	Ranking
Janeiro	83,50%	7°
Fevereiro	76,55%	9°
Março	84,89%	6°
Abril	85,06%	5°
Maio	82,96%	8°
Junho	87,16%	3°
Julho	91,78%	1°
Agosto	91,53%	2°
Setembro	85,90%	4°
Outubro	59,75%	10°
Novembro	55,68%	11°
Dezembro	53,83%	12°

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

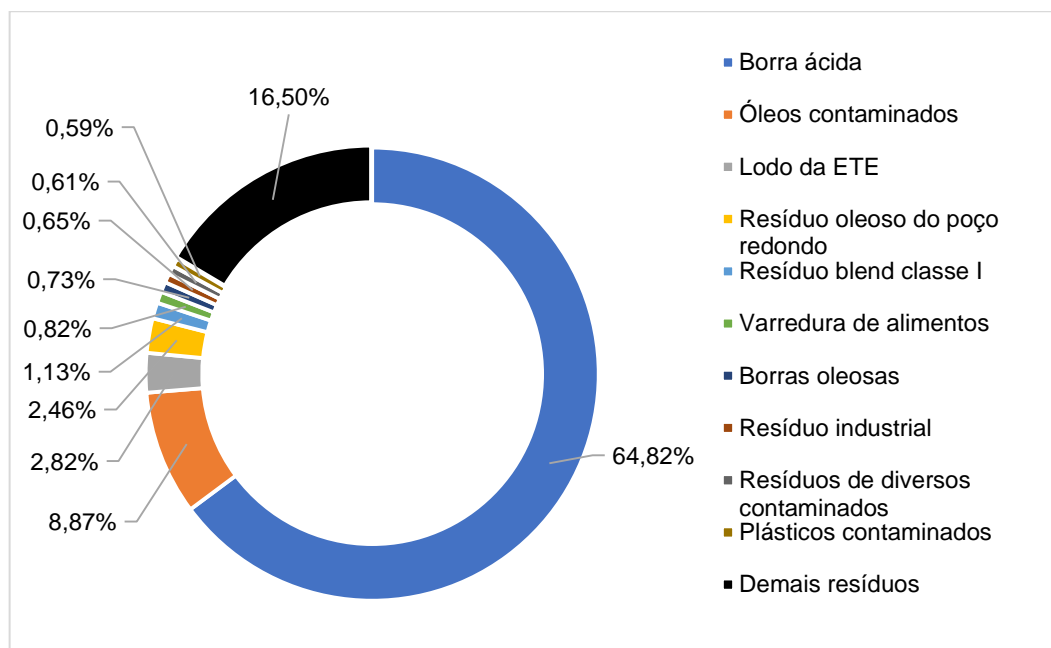
Os 10 principais resíduos com maior massa utilizados na formulação de *blends* para o coprocessamento da empresa A, compreendem mais da metade da massa em todos os meses analisados. Isso nos indica que o perfil da composição do *blend* tem maior influência destes principais resíduos.

6.1.1 Cenário 1 - Janeiro

Apresentando mais da metade do total recebido, 64,82% correspondem a **borra ácida** sendo o resíduo com maior massa utilizada na produção de *blends* no mês de janeiro de 2020, figura 16. Trata-se de um resíduo com características mais sólidas, conforme declarado pela empresa A gerado na indústria siderúrgica, cuja frequência de recebimento é constante e suficiente para que seja incorporado no *blend* diariamente.

Os **óleos contaminados**, resíduo líquido, gerado em atividades siderúrgicas apresenta a segunda maior massa. O resíduo foi recebido para a formulação de *blends* em todos os dias de processamento para o mês vigente, confirmando sua possibilidade de utilização no *blend* produzido diariamente.

Figura 16 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em janeiro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Embora o resíduo de **óleos contaminados** seja o segundo com maior massa, é importante destacar que este apresenta uma diferença de 55,95% em massa do resíduo de **borra ácida**, ou seja, o resíduo de borra ácida possui maior destaque e consequentemente maior contribuição no poder calorífico do *blend*.

O resíduo de **lodo da ETE**, pastoso, gerado em diversas indústrias, com destaque para a indústria de bebidas, tem recebimento constante e é um dos resíduos que contribui diariamente na composição do *blend*.

O resíduo **oleoso do poço redondo**, líquido, gerado em atividades siderúrgicas, embora esteja classificado entre os 10 resíduos com maior massa para o mês em questão, não foi recebido com frequência suficiente para compor o *blend* diariamente.

O resíduo chamado de **resíduo blend classe I**, que representa 1,13% da massa total para o mês de janeiro de 2020, é um resíduo sólido, gerado nas atividades de uma empresa do ramo automotivo. Embora o resíduo citado esteja entre os 10 com maior massa, este foi recebido apenas em 4 dias no mês de janeiro, contribuindo somente em dias específicos.

O resíduo de **varredura de alimentos**, sólido, gerado nas atividades de uma indústria alimentícia, representa menos de 1% da massa total e foi recebido em 3 dias bem distintos no mês vigente.

A **borra oleosa** é um resíduo de características mais sólidas, onde mais de uma indústria realiza a destinação para a empresa A. A maior destinação foi oriunda de uma empresa de operações logísticas, podendo ser de um cliente externo ou não. Para este resíduo a contribuição na composição do *blend* é pontual.

O **resíduo industrial**, sólido, é gerado em uma indústria do ramo automotivo. Aparece como o oitavo resíduo com maior massa no mês vigente, representando 0,65% da massa total e foi recebido cinco vezes em dias distintos, com isso, não faz parte do *blend* produzido diariamente.

O **resíduo de diversos contaminados**, sólido, gerado numa indústria mineradora, apesar de estar entre os 10 resíduos com maior massa, contribui na formulação do *blend* apenas em cinco dias no mês de janeiro.

O resíduo de **plásticos contaminados**, sólido, é gerado em diversas indústrias e empresas, com destaque para uma dada empresa de reciclagem. Este resíduo é recebido de modo a compor o *blend* em sua produção diária.

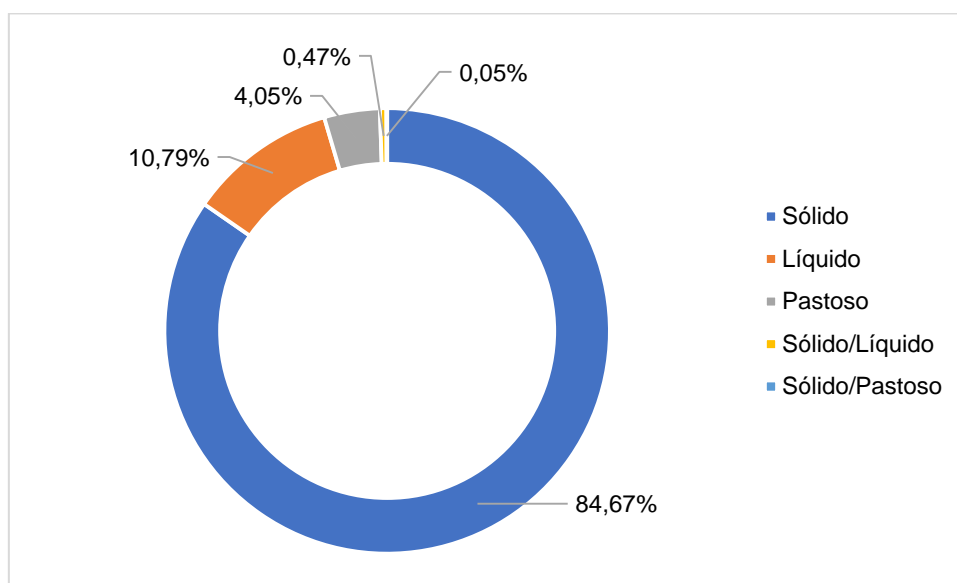
Como apresentado na figura 16, na cor preta, a parte descrita como “demais resíduos” representa o somatório da massa de todos os resíduos que não compreendem os 10 resíduos com maior massa no mês em análise, isto é, 16,50%. Mesmo se tratando do somatório de uma quantidade que poderia representar muito mais, é visto que os 10 resíduos compreenderam, em massa, o suficiente para representar o perfil geral do *blend*.

De acordo com a análise realizada, os resíduos que estiveram presentes nos *blends* produzidos diariamente¹⁰ no mês de janeiro, foram a **borra ácida, óleo contaminado com água, lodo de ETE e o plástico contaminado**.

¹⁰ Considerando que não houve o armazenamento de nenhum deles, visto que tal informação é desconhecida. A mesma premissa é válida para os demais cenários.

Quanto ao estado físico dos resíduos utilizados na produção dos *blends*, incluindo os “demais resíduos” e como declarado pela empresa A, majoritariamente são utilizados resíduos sólidos, como mostra a figura 17. As demais distribuições podem ser acompanhadas na figura.

Figura 17 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de janeiro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A estimativa do poder calorífico para o mês de janeiro, está baseada na análise gravimétrica, segundo a figura 16. O poder calorífico inferior de cada resíduo, será considerado conforme mostra a tabela 5. E para os cálculos, as equações (1) e (2) serão usadas para estimar o poder calorífico inferior e a equação (3) para determinar a diferença relativa.

De acordo com a estimativa, tabela 8, o PCI do *blend* para o mês de janeiro pode estar entre 3.857,40 kcal e 4.003,81 kcal/kg. Onde as maiores contribuições foram da **borra ácida** e do **óleo contaminado**. Lembrando que o valor médio relatado por uma determinada indústria cimenteira B1, que recebe *blends* da empresa A foi de 3.544,00 kcal/kg (Empresa B1, 2017), com isso a diferença relativa para esta estimativa está entre 8,84% e 12,82%, respectivamente.

Tabela 8 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em janeiro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	64,82	3.591,00	3.591,00	2.327,68	2.327,68
Óleo contaminado	8,87	9.600,00	9.600,00	851,52	851,52
Lodo da ETE	2,82	4.442,53	4.442,53	125,17	125,17
Resíduo oleoso do poço redondo	2,46	2.078,00	2.078,00	51,19	51,19
Resíduo <i>blend</i> classe I	1,13	2.000,00	2.775,00	22,68	31,47
Varredura de alimentos	0,82	2.000,00	1.311,00	16,34	16,34
Borra oleosa	0,73	9.646,00	9.646,00	70,47	70,47
Resíduo industrial	0,65	2.000,00	2.775,00	12,96	17,98
Resíduos de diversos contaminados	0,61	2.000,00	2.775,00	12,26	17,01
Plásticos contaminados	0,59	6.301,00	6.301,00	37,21	37,21
Demais resíduos	16,50	2.000,00	2.775,00	329,92	457,77
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.857,40	4.003,81

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota: Para a análise dos próximos meses, serão detalhados apenas os resíduos que não apareceram anteriormente.

6.1.2 Cenário 2 – Fevereiro

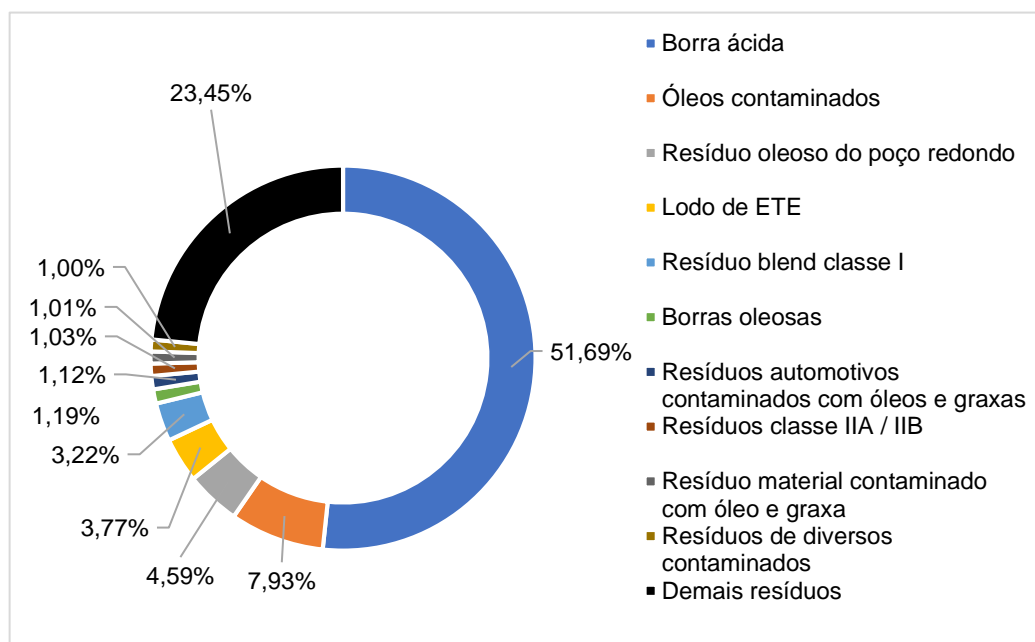
Neste cenário, a **borra ácida** aparece como o resíduo com maior massa mensal. Desta vez representando 51,69% do total, sendo seu recebimento diário, figura 18.

Dos resíduos sequentes, sendo deles, o óleo contaminado com água, resíduo oleoso do poço redondo, lodo de ETE, resíduo *blend* classe I e borra oleosa, apenas os resíduos de **óleo contaminado** e o **lodo de ETE** foram recebidos de modo a serem processados diariamente na produção dos *blends*.

Os **resíduos automotivos contaminados com óleo**, sólidos, são gerados principalmente em empresas relacionadas à combustível e transportes. Em alguns dias específicos do seu recebimento, possuem alta frequência. Este resíduo não é recebido de modo a ser parte do *blend* produzido diariamente.

Os **resíduos classe IIA/IIB**, sólido, advém de uma indústria do ramo automobilístico e é recebido apenas em quatro dias em todo o mês.

Figura 18 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em fevereiro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O **resíduo material contaminado com óleo e graxa**, cujo seu estado físico é sólido/líquido, é gerado em uma indústria siderúrgica. Embora sua frequência seja maior que alguns resíduos citados anteriormente, este não foi processado no *blend* diariamente.

Os **resíduos de diversos contaminados**, é um resíduo sólido, gerado em uma indústria mineradora. Sua frequência de recebimento foi insuficiente para a produção diária, fazendo parte da produção em alguns dias específicos. Os **demais resíduos** aparecem em minoria no mês, sendo apenas 23,45%.

O valor estimado para o PCI do mês de fevereiro, segue a análise gravimétrica da figura 18, e conforme mostra a tabela 9, o PCI pode estar entre 3.612,06 kcal/kg e 3.850,97 kcal/kg. As maiores contribuições foram da **borra ácida** e dos **óleos contaminados**. A diferença relativa para este cálculo está entre 1,92% e 8,66%.

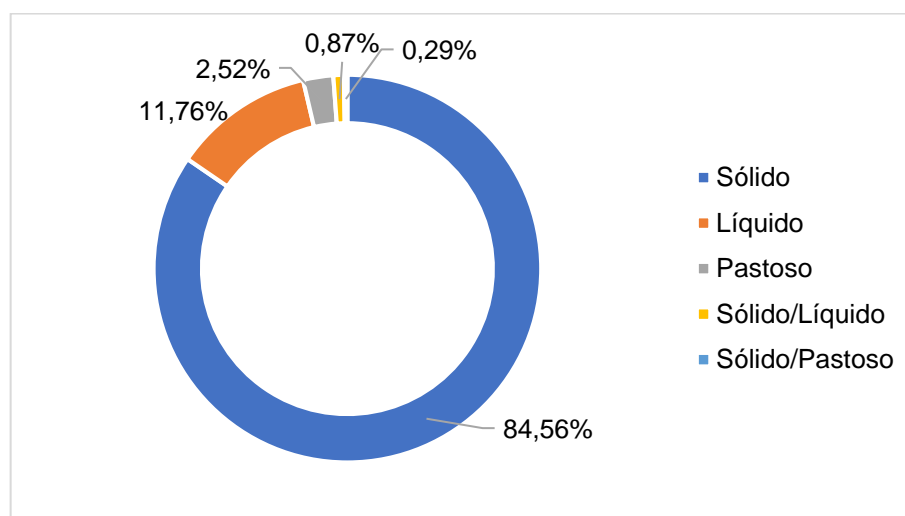
Tabela 9 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em fevereiro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	51,69	3.591,00	3.591,00	1.856,06	1.856,06
Óleos contaminados	7,93	9.600,00	9.600,00	761,24	761,24
Resíduo oleoso do poço redondo	4,59	2.078,00	2.078,00	95,33	95,33
Lodo de ETE	3,77	4.442,53	4.442,53	167,69	167,69
Resíduo blend classe I	3,22	2.000,00	2.775,00	64,45	89,42
Borras oleosas	1,19	9.646,00	9.646,00	115,18	115,18
Resíduos automotivos contaminados com óleos e graxas	1,12	2.000,00	2.775,00	22,38	31,06
Resíduos classe IIA / IIB	1,03	2.000,00	2.775,00	20,62	28,61
Resíduo material contaminado com óleo e graxa	1,01	2.000,00	2.775,00	20,20	28,02
Resíduos diversos contaminados	1,00	2.000,00	2.775,00	19,91	27,62
Demais resíduos	23,45	2.000,00	2.775,00	469,00	650,74
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.612,06	3.850,97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para o mês de fevereiro, de acordo com a figura 19, são utilizados em maioria, resíduos no estado sólido.

Figura 19 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de fevereiro de 2020



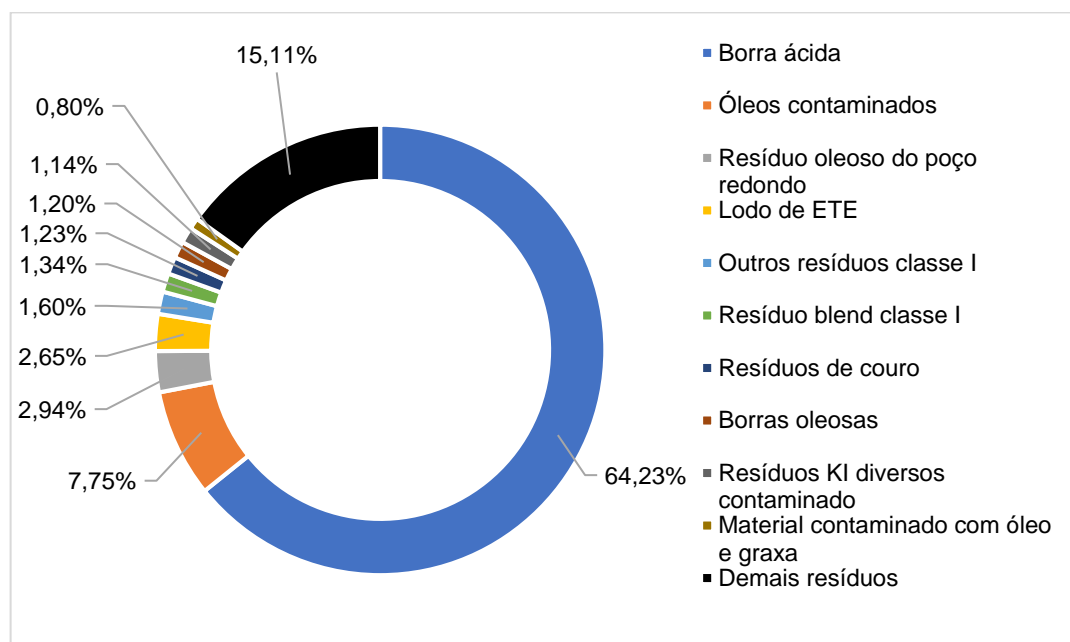
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Segundo a análise realizada e em relação aos 10 resíduos com maior massa, pode-se afirmar que os resíduos que estiveram presentes nos *blends* produzidos diariamente no mês de fevereiro, foram a **borra ácida**, **óleos contaminados** e **lodo de ETE**.

6.1.3 Cenário 3 – Março

Pelo terceiro mês consecutivo, figura 20, a **borra ácida** representa o resíduo com maior massa, desta vez com 64,23%. O resíduo é recebido com alta frequência diária, com isso tendo a capacidade de ser incorporado no *blend* diariamente.

Figura 20 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em março de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resíduos de **óleos contaminados** e **lodo de ETE** foram recebidos na unidade podendo ser utilizados diariamente na produção dos *blends*.

Os resíduos de **couro**, sólido, foi originado em uma empresa curtidora de couro, cujo seu recebimento foi insuficiente para incorporação no *blend* produzido diariamente.

Os resíduos: outros resíduos classe I, borra oleosa, resíduo KI diversos contaminado e material contaminado com óleo e graxa, não fizeram parte da produção diária dos *blends*, sendo recebidos apenas em dias específicos. Os **demais resíduos** representam 15,11% do total.

O poder calorífico inferior estimado para o mês de março, tabela 10, está entre 3.789,87 kcal/kg e 3.944,85 kcal/kg e as maiores contribuições, seguem sendo da

borra ácida e do **óleo contaminado**. A diferença relativa para esta estimativa está entre 6,94% e 11,31%.

Conforme a figura 21, os resíduos que compõem o *blend* são principalmente os resíduos sólidos.

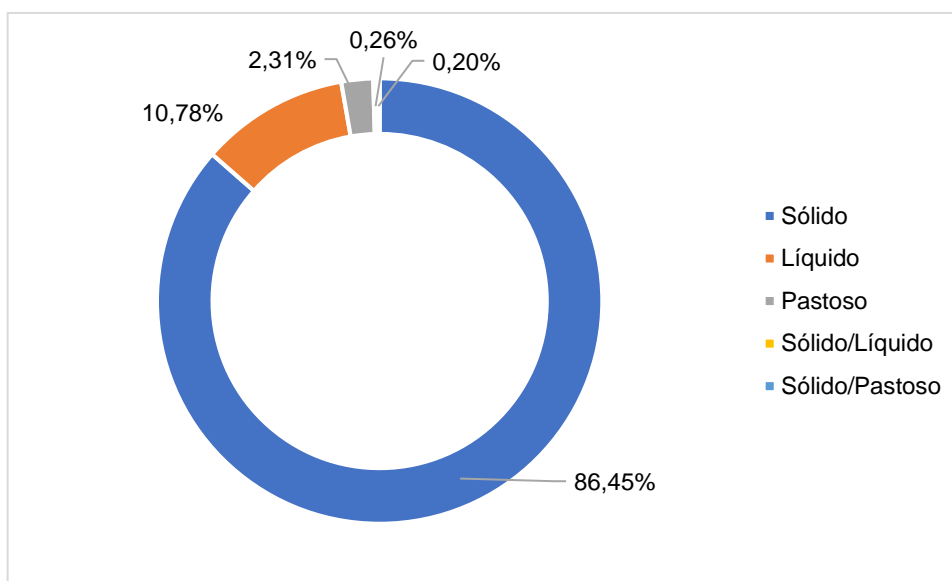
Neste mês, os resíduos que obtiveram destaque e fizeram parte da produção diária do *blend* são a **borra ácida**, **óleos contaminados** e **lodo de ETE**. Os resíduos líquidos seguem sendo o segundo colocado.

Tabela 10 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em março de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	64,23	3.591,00	3.591,00	2.306,39	2.306,39
Óleos contaminados	7,75	9.600,00	9.600,00	744,11	744,11
Resíduo oleoso do poço redondo	2,94	2.078,00	2.078,00	61,12	61,12
Lodo de ETE	2,65	4.442,53	4.442,53	117,74	117,74
Outros resíduos classe I	1,60	2.000,00	2.775,00	32,07	44,50
Resíduo blend classe I	1,34	2.000,00	2.775,00	26,76	37,12
Resíduos de couro	1,23	3.629,00	3.629,00	44,75	44,75
Borras oleosas	1,20	9.646,00	9.646,00	115,84	115,84
Resíduos KI diversos contaminado	1,14	2.000,00	2.775,00	22,80	31,63
Material contaminado com óleo e graxa	0,80	2.000,00	2.775,00	16,07	22,30
Demais resíduos	15,11	2.000,00	2.775,00	302,23	419,34
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.789,87	3.944,85

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 21 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de março de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.4 Cenário 4 – Abril

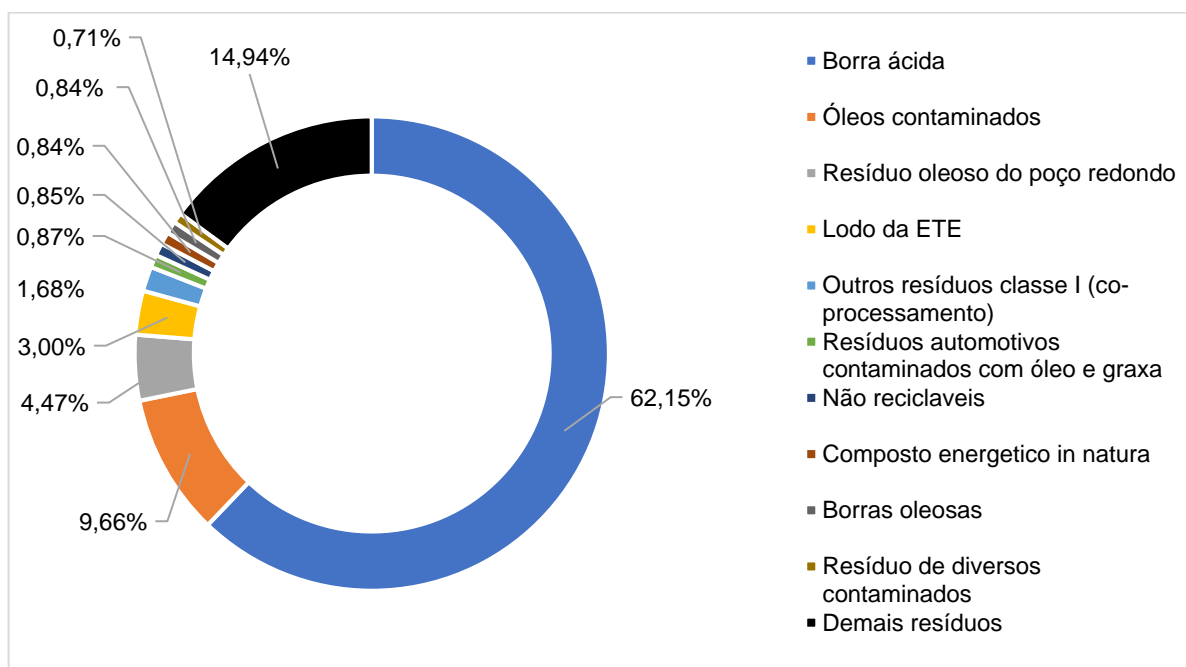
A **borra ácida** foi o resíduo com maior massa em abril, 62,15%, permanecendo predominante entre os meses analisados até o momento, figura 22. Para o mês em questão, a borra ácida foi recebida dezesseis vezes, com isso, seguindo a consideração da incorporação diária no *blend*, o resíduo não será considerado.

O único resíduo que compõe o *blend* diariamente no mês de abril, foi o resíduo de **óleos contaminados**. Os demais foram recebidos em dias específicos.

É importante destacar que embora os **resíduos automotivos contaminados com óleo e graxa** não tenham sido recebidos diariamente, este é recebido com alta frequência nos dias específicos.

Tendo em vista o cenário analisado, a estimativa do poder calorífico para o mês de abril está entre 3.863,95 kcal/kg e 4.018,07 kcal/kg, conforme mostra a tabela 11. As maiores contribuições foram da **borra ácida** e dos **óleos contaminados**. A diferença relativa para esta estimativa é de 9,03% a 13,38%.

Figura 22 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em abril de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

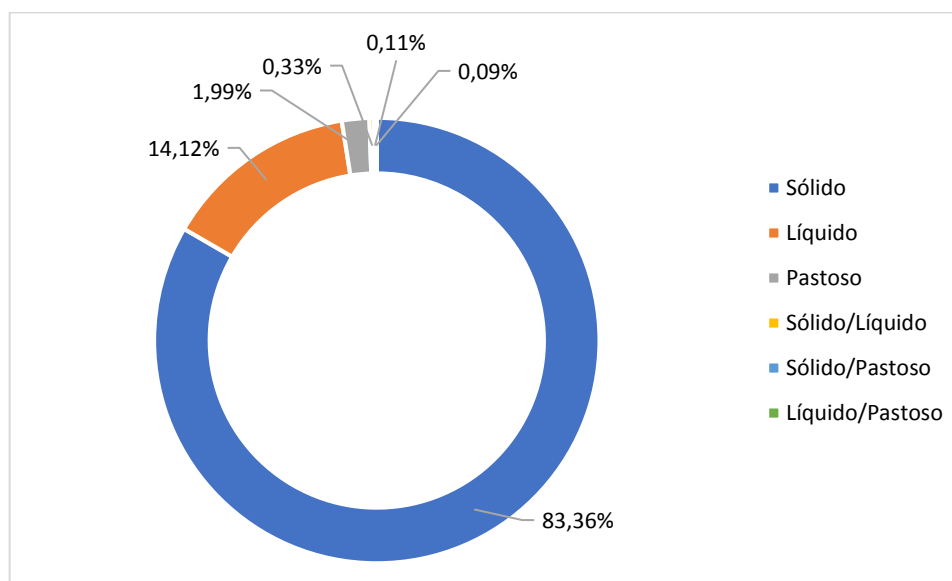
Tabela 11 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em abril de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	62,15	3.591,00	3.591,00	2.231,72	2.231,72
Óleos contaminados	9,66	9.600,00	9.600,00	927,40	927,40
Resíduo oleoso do poço redondo	4,47	2.078,00	2.078,00	92,83	92,83
Lodo da ETE	3,00	4.442,53	4.442,53	133,08	133,08
Outros resíduos classe I	1,68	2.000,00	2.775,00	33,52	46,51
Resíduos automotivos contaminados com óleo e graxa	0,87	2.000,00	2.775,00	17,33	24,05
Não recicláveis	0,85	2.000,00	2.775,00	16,93	23,49
Composto energético in natura	0,84	2.000,00	2.775,00	16,87	23,41
Borras oleosas	0,84	9.646,00	9.646,00	81,15	81,15
Resíduo de diversos contaminados	0,71	2.000,00	2.775,00	14,24	19,75
Demais resíduos	14,94	2.000,00	2.775,00	298,86	414,67
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.863,95	4.018,07

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em relação ao estado físico, a maior porcentagem segue sendo de resíduos no estado sólido, 83,36%, conforme a figura 23.

Figura 23 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de abril de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.5 Cenário 5 – Maio

Com 72,86% em massa, a **borra ácida**, foi o resíduo com maior destaque para o mês de maio, figura 24. Além disso, o resíduo foi recebido diariamente, com alta frequência, tendo a capacidade de ser utilizado e incorporado no *blend* produzido durante todo o mês.

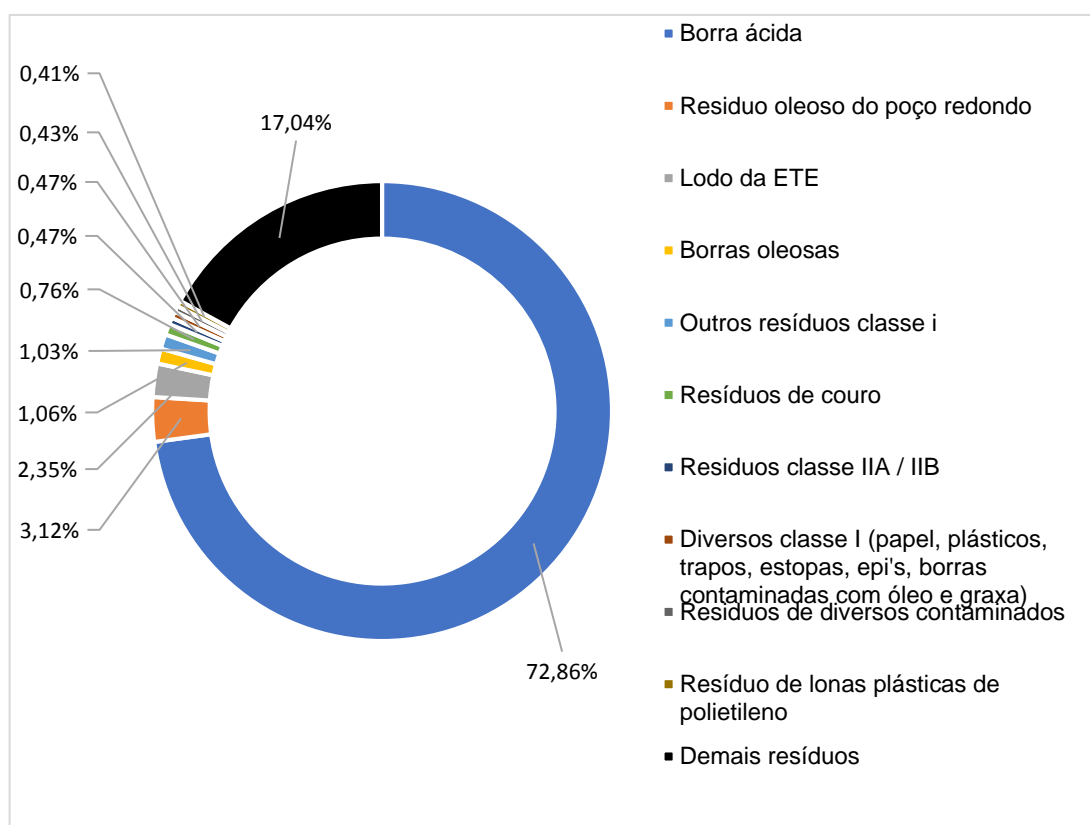
O resíduo de **lona plástica de polietileno**, que surge pela primeira vez entre os resíduos com maior massa, sólido, foi gerado em uma indústria de mineração e foi recebido em poucos dias do mês.

Até o atual momento, percebe-se pela primeira vez que os resíduos seguintes a borra ácida, apresentam porcentagens abaixo de 6%, neste caso 3,12%, e que considerando este grupo somente o **lodo de ETE** foi recebido diariamente.

O poder calorífico inferior do *blend* no mês de maio, segundo a estimativa calculada, tabela 12, pode ser de 3.300,15 kcal/kg à 3.480,81 kcal/kg. O resíduo que mais contribuiu foi a borra ácida e os “demais resíduos”. A diferença relativa referente a esta estimativa é de 6,03% a 1,78%.

Quanto ao estado físico, ainda é predominante o uso de resíduos sólidos seguido por líquido e pastoso, conforme mostra a figura 25.

Figura 24 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em maio de 2020



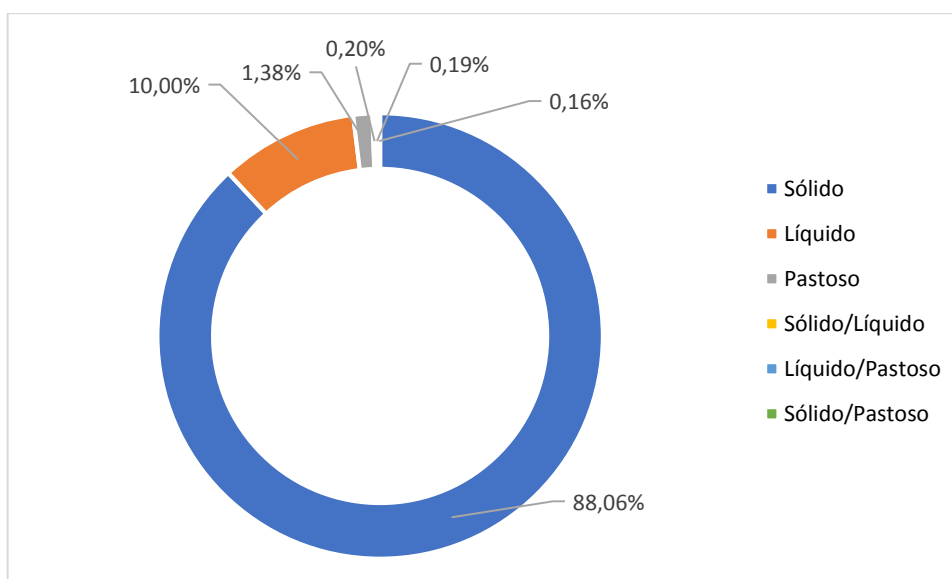
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 12 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em maio de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	72,86	3.591,00	3.591,00	2.616,23	2.616,23
Resíduo oleoso do poço redondo	3,12	2.078,00	2.078,00	64,89	64,89
Lodo da ETE	2,35	4.442,53	4.442,53	104,18	104,18
Borras oleosas	1,06	9.646,00	9.646,00	102,32	102,32
Outros resíduos classe I	1,03	2.000,00	2.775,00	20,58	28,56
Resíduos de couro	0,76	3629,00	3629	27,69	27,69
Resíduos classe IIA / IIB	0,47	2.000,00	2.775,00	9,47	13,14
Diversos classe I (papel, plásticos, trapos, estopas, epi's, borras contaminadas com óleo e graxa)	0,47	2.000,00	2.775,00	9,36	12,98
Resíduos de diversos contaminados	0,43	2.000,00	2.775,00	8,51	11,81
Resíduo de lonas plásticas	0,41	6.301,00	6.301,00	26,04	26,04
Demais resíduos	17,04	2.000,00	2.775,00	340,88	472,97
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.330,15	3.480,81

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 25 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de maio de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

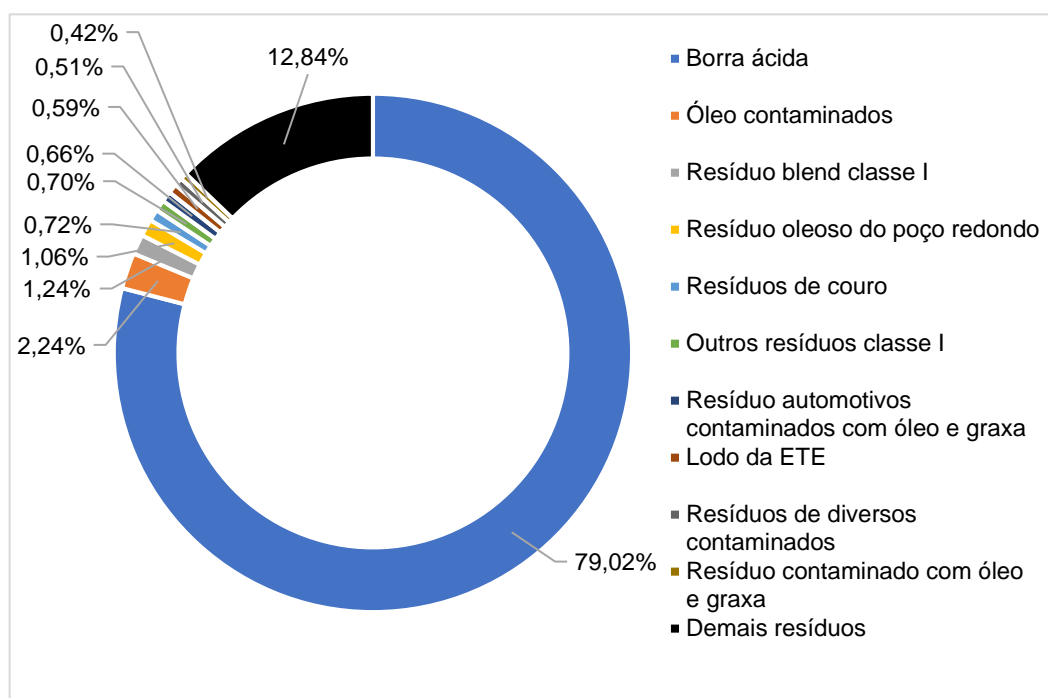
6.1.6 Cenário 6 – Junho

Para o mês de junho é visto que todos os resíduos que representam os 10 com maior massa, já foram utilizados nos meses anteriores. Os resíduos com maior massa e que podem ter sido utilizados nos *blends* diariamente foram a **borra ácida** e os **resíduos automotivos contaminados com óleo e graxa**, onde ambos tiveram alta frequência de recebimento no mês. Os outros resíduos representados na figura 26, foram recebidos pontualmente.

O poder calorífico inferior estimado para o mês, de acordo com a tabela 13, pode ser encontrado entre 3.454,62 kcal/kg e 3.581,45 kcal/kg, sendo a maior contribuição da **borra ácida**. A diferença relativa é de 2,52% a 1,06%.

Representando a maior porcentagem expressa até o momento, os resíduos sólidos com 94,19%, figura 27, são os mais utilizados.

Figura 26 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em junho de 2020



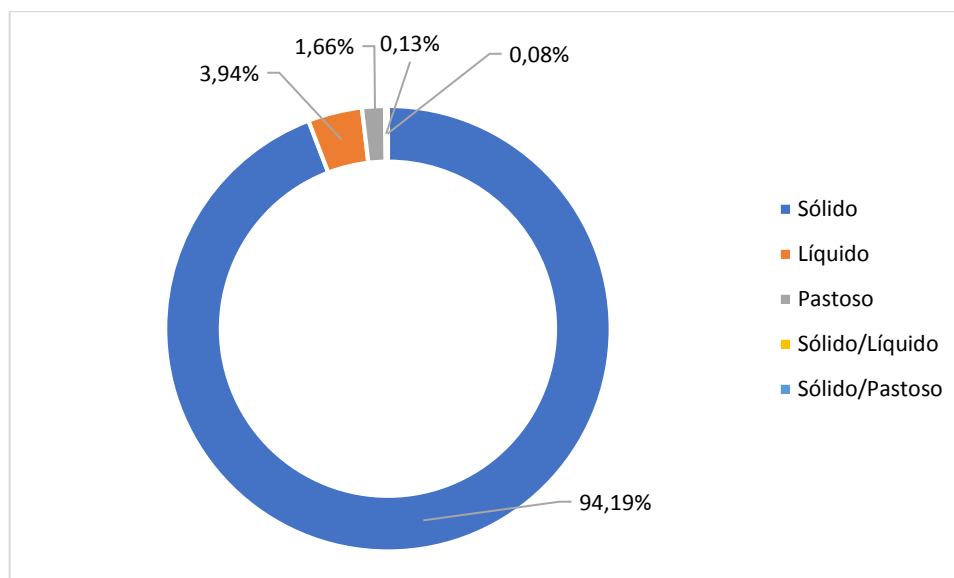
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 13 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em junho de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	79,02	3.591,00	3.591,00	2.837,78	2.837,78
Óleos contaminados	2,24	9.600,00	9.600,00	215,23	215,23
Resíduo blend classe I	1,24	2.000,00	2.775,00	24,75	34,34
Resíduo oleoso do poço redondo	1,06	2.078,00	2.078,00	22,02	22,02
Resíduos de couro	0,72	3.629,00	3.629,00	26,17	26,17
Outros resíduos classe I	0,70	2.000,00	2.775,00	13,95	19,35
Resíduo automotivos contaminados com óleo e graxa	0,66	2.000,00	2.775,00	13,13	18,21
Lodo da ETE	0,59	4.442,53	4.442,53	26,14	26,14
Resíduos de diversos contaminados	0,51	2.000,00	2.775,00	10,29	14,28
Resíduo contaminado com óleo e graxa	0,42	2.000,00	2.775,00	8,39	11,64
Demais resíduos	12,84	2.000,00	2.775,00	256,78	356,29
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.454,62	3.581,45

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 27 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de junho de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.7 Cenário 7 – Julho

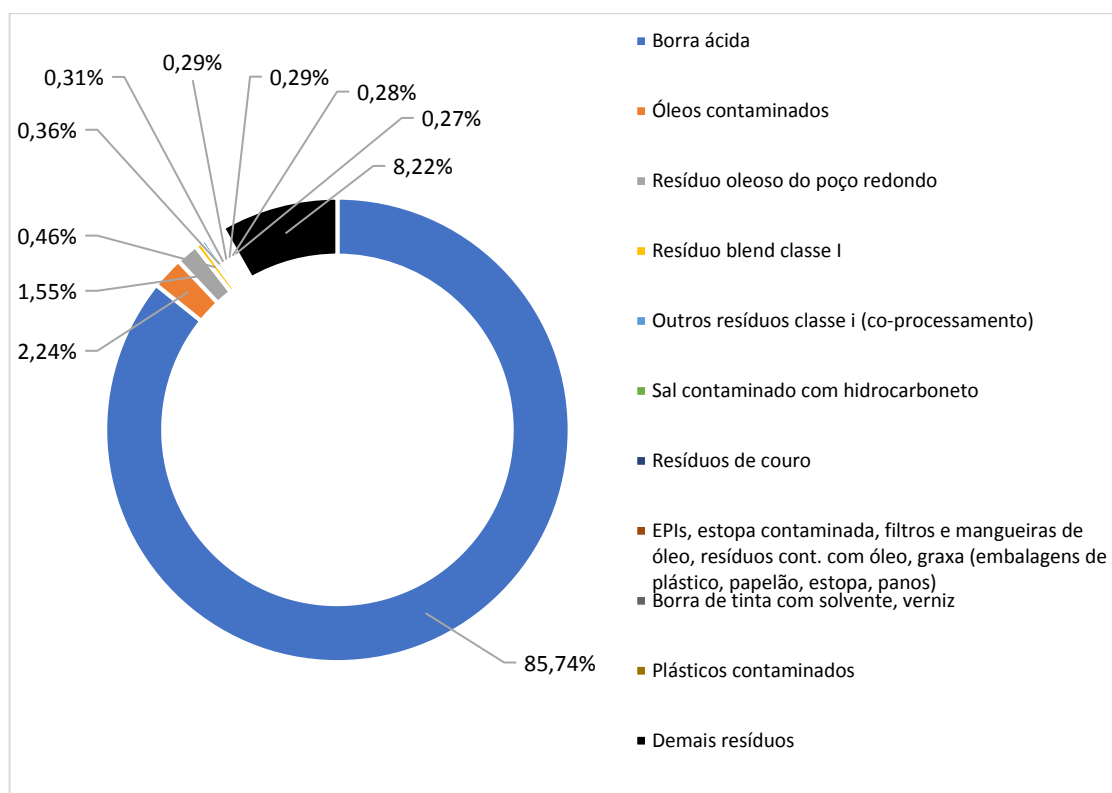
Para o mês de julho, apresentando a maior porcentagem vista até o momento, 85,74%, a **borra ácida** foi o resíduo mais incorporado no *blend*, figura 28. Além disso, foi o único resíduo com o potencial de ser utilizado diariamente no mês.

O resíduo de **sal contaminado com hidrocarboneto**, sólido, foi gerado em uma indústria refinadora de petróleo. Aparece pela primeira vez entre os resíduos com maior massa e representa 0,31%.

O poder calorífico inferior estimado para o mês em questão, tabela 14, está entre 3.551,51 kcal/kg e 3.628,34 kcal/kg, sendo a maior contribuição da **borra ácida**. A diferença relativa é de 0,21% a 2,38%.

Quanto ao estado físico dos resíduos, o estado sólido continua sendo predominante, seguido pelo estado líquido e pastoso, figura 29.

Figura 28 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em julho de 2020



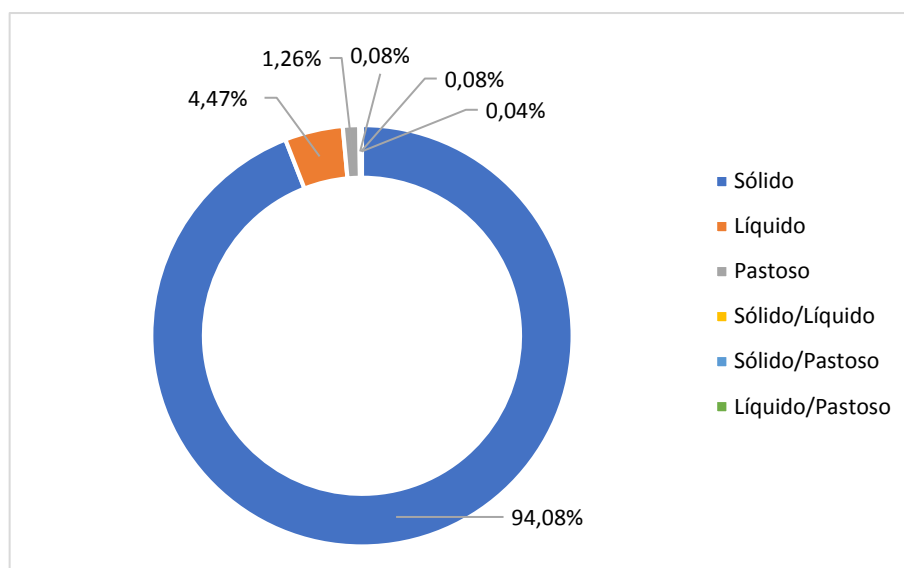
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 14 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em julho de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	85,74	3.591,00	3.591,00	3.078,95	3.078,95
Óleos contaminados	2,24	9.600,00	9.600,00	214,72	214,72
Resíduo oleoso do poço redondo	1,55	2.078,00	2.078,00	32,24	32,24
Resíduo blend classe I	0,46	2.000,00	2.775,00	9,16	12,71
Outros resíduos classe I	0,36	2.000,00	2.775,00	7,17	9,95
Sal contaminado com hidrocarboneto	0,31	2.000,00	2.775,00	6,23	8,65
Resíduos de couro	0,29	3.629,00	3.629,00	10,58	10,58
Borra de tinta com solvente, verniz	0,29	2.000,00	2.775,00	5,73	7,96
EPI's, estopa contaminada, filtros e mangueiras de óleo, resíduos cont. com óleo, graxa (embalagens de plástico, papelão, estopa, panos)	0,28	2.000,00	2.775,00	5,66	7,85
Plásticos contaminados	0,27	6.301,00	6.301,00	16,75	16,75
Demais resíduos	8,22	2.000,00	2.775,00	164,32	227,99
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.551,51	3.628,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de julho de 2020

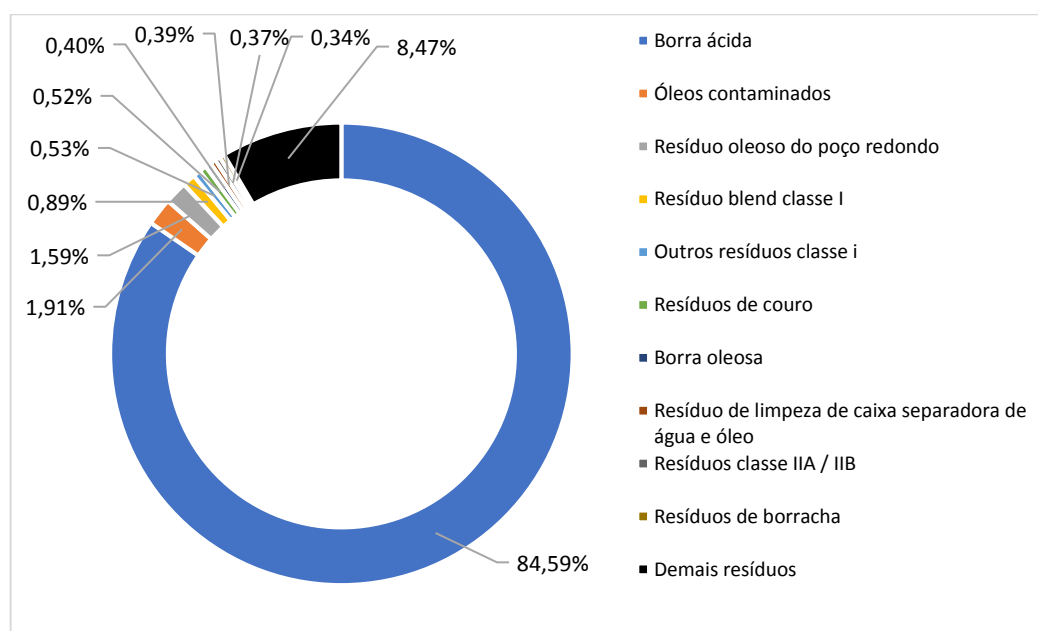


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.8 Cenário 8 – Agosto

O resíduo com maior massa no mês de agosto, foi a **borra ácida** com 84,59%, figura 30. Este resíduo novamente foi recebido com alta frequência no mês e foi o único com potencial de compor o *blend* diariamente, visto a produção.

Figura 30 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em agosto de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A estimativa do poder calorífico inferior calculada para o mês, de acordo com a tabela 15, pode estar entre 3.548,34 kcal/kg e 3.630,82 kcal/kg. A maior contribuição foi da **borra ácida**. A diferença relativa está entre 0,12% e 2,45%.

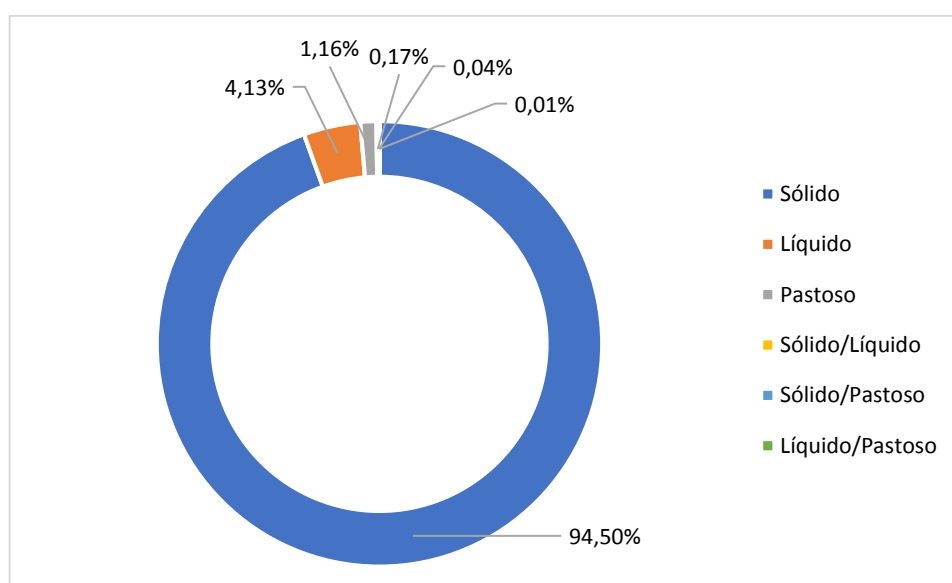
Tabela 15 - Estimativa do poder calorífico inferior do blend em agosto de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	84,59	3.591,00	3.591,00	3.037,50	3.037,50
Óleos contaminados	1,91	9.600,00	9.600,00	183,79	183,79
Resíduo oleoso do poço redondo	1,59	2.078,00	2.078,00	32,98	32,98
Resíduo blend classe I	0,89	2.000,00	2.775,00	17,90	24,83
Outros resíduos classe I	0,53	2.000,00	2.775,00	10,51	14,58
Resíduos de couro	0,52	3.629,00	3.629,00	18,95	18,95
Borras oleosas	0,40	9.646,00	9.646,00	38,98	38,98
Resíduo de limpeza de caixa separadora de água e óleo	0,39	2.000,00	2.775,00	7,75	10,75
Resíduos classe IIA / IIB	0,37	2.000,00	2.775,00	7,31	10,14
Resíduos de borracha	0,34	6.780,00	6.780,00	23,30	23,30
Demais resíduos	8,47	2.000,00	2.775,00	169,38	235,02
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.548,34	3.630,82

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O estado físico mensal ainda segue o mesmo perfil apresentado anteriormente, onde o estado sólido é predominante, figura 31. Entretanto, passa a ser o mês com maior representação dos resíduos sólidos, o que anteriormente era constatado no mês de julho.

Figura 31 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de agosto de 2020



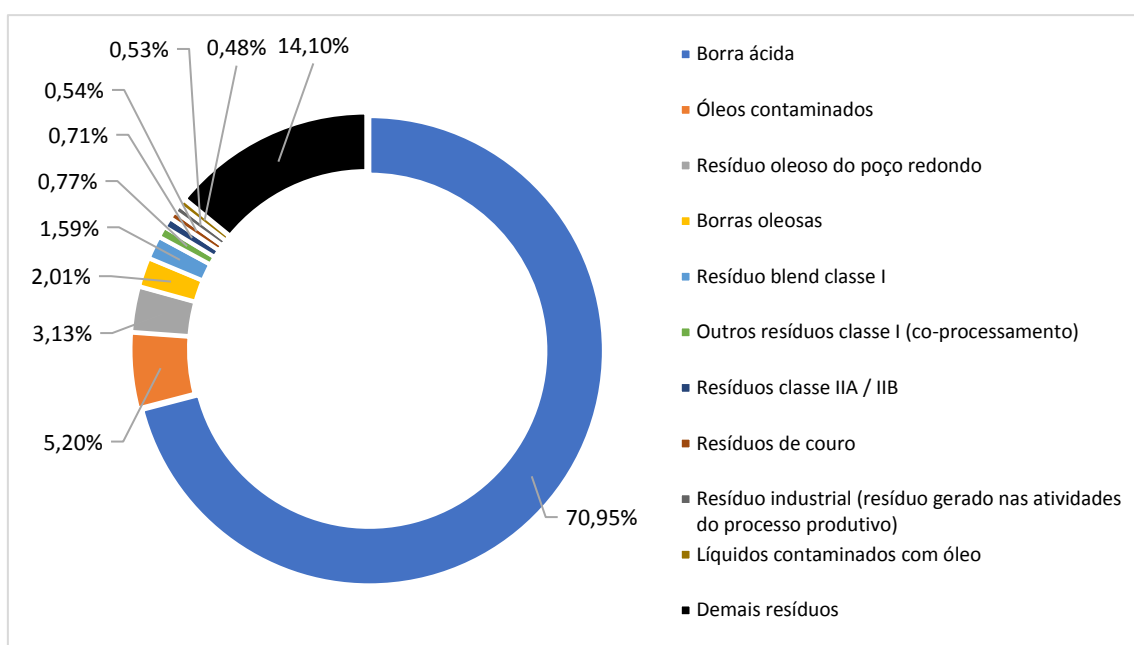
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.9 Cenário 9 – Setembro

No mês de setembro os resíduos que estiveram em destaque foram a **borra ácida** e os **óleos contaminados**, conforme mostra a figura 32. A maior massa é representada pela borra ácida. Ambos os resíduos foram recebidos com a possibilidade de serem incorporados ao *blend* produzido diariamente.

O resíduo de **líquidos contaminados** é oriundo de uma empresa de tratamento de resíduos. Este resíduo aparece pela primeira entre os 10 com maior massa, representando 0,53% da massa total.

Figura 32 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em setembro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O poder calorífico inferior estimado para o mês de setembro pode estar entre 3.689,09 kcal/kg e 3.829,96 kcal/kg. De acordo com a tabela 16, as principais contribuições foram da **borra ácida** e dos **óleos contaminados**. A diferença relativa para este cálculo é de 4,09% a 8,07%.

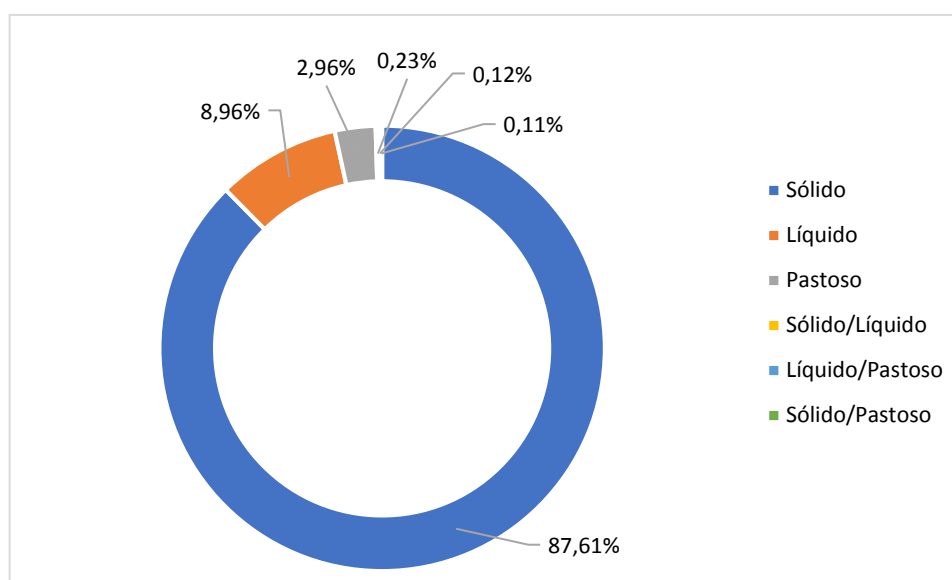
Quanto ao estado físico do mês em análise, o sólido é o de maior utilização. Em seguida, ainda com certa relevância, tem-se os resíduos líquidos e pastosos, figura 33.

Tabela 16 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em setembro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Borra ácida	70,95	3.591,00	3.591,00	2.547,74	2.547,74
Óleos contaminados	5,20	9.600,00	9.600,00	499,55	499,55
Resíduo oleoso do poço redondo	3,13	2.078,00	2.078,00	64,96	64,96
Borras oleosas	2,01	9.646,00	9.646,00	193,85	193,85
Resíduo blend classe I	1,59	2.000,00	2.775,00	31,76	44,06
Outros resíduos classe I	0,77	2.000,00	2.775,00	15,31	21,24
Resíduos classe IIA / IIB	0,71	2.000,00	2.775,00	14,15	19,63
Resíduos de couro	0,54	3.629,00	3.629,00	19,46	19,46
Resíduo industrial	0,53	2.000,00	2.775,00	10,58	14,67
Líquidos contaminados com óleo	0,48	2.000,00	2.775,00	9,70	13,45
Demais resíduos	14,10	2.000,00	2.775,00	282,05	391,34
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.689,09	3.829,96

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 33 - Estado físico dos resíduos utilizados no mês de setembro de 2020

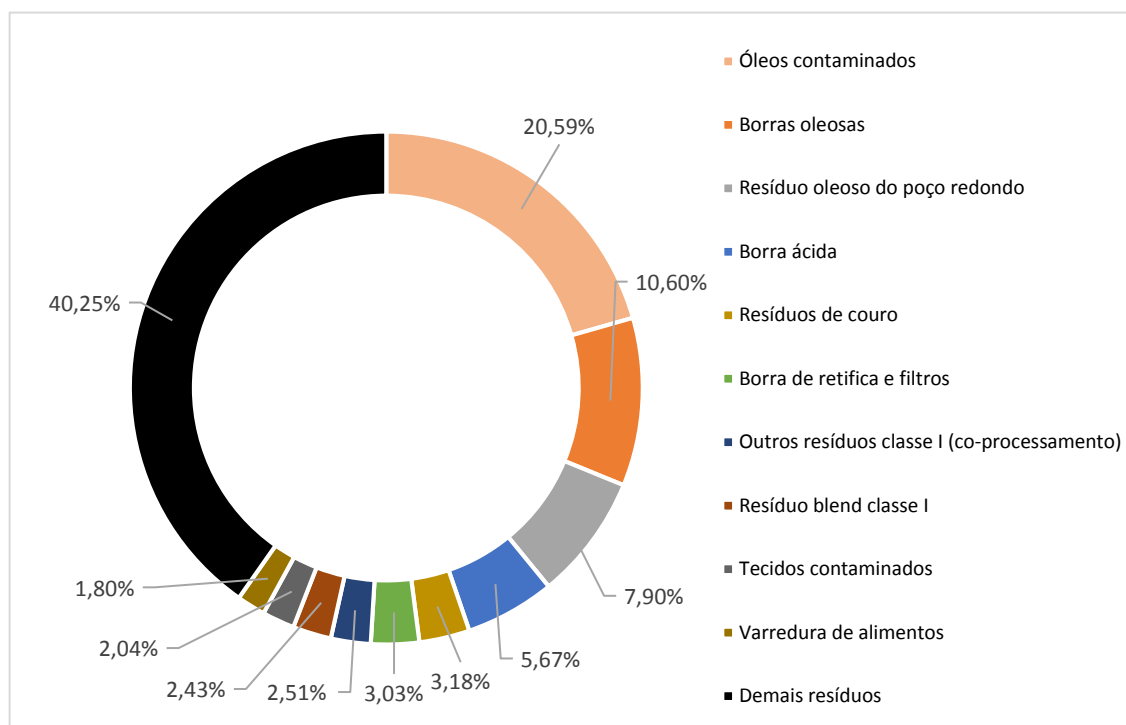


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.10 Cenário 10 – Outubro

Anteriormente, é visto que a borra ácida aparecia como protagonista em todos os meses. Contudo, para o mês de outubro o mesmo não ocorreu e uma mudança no perfil dos resíduos é observada, como mostra a figura 34. Além disso, o resíduo de **borra ácida** correspondeu apenas a 5,67% da massa e foi recebido apenas em um dia do mês, não compondo o *blend* diariamente.

Figura 34 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em outubro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor.

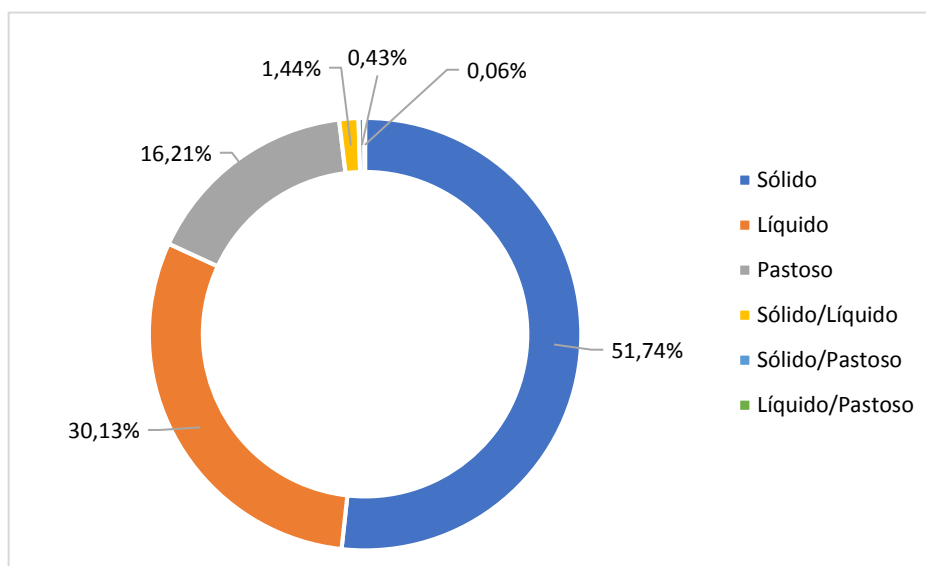
Com isso, o resíduo de **óleos contaminados** passa a ocupar a primeira posição com 20,59%. Mesmo sendo o resíduo de maior massa, este não alcançou mais 50% como era visto para a borra ácida. O resíduo foi o único recebido diariamente, podendo compor o *blend* diariamente.

Em específico o resíduo de **borra de retífica e filtros** aparece apenas no mês de outubro entre os resíduos com maior massa. O resíduo foi gerado numa determinada indústria automobilística, foi recebido apenas em dias durante o mês e representa 3,03% da massa total.

Devido a mudança no perfil dos resíduos analisados, os **demais resíduos** representaram pela primeira vez uma porcentagem acima de 23,45%, sendo 40,25%.

O perfil do estado físico neste mês também sofreu mudanças, como é visto na figura 35, tendo maior aumento na porcentagem dos resíduos líquidos e pastosos.

Figura 35 - Perfil do estado físico dos resíduos utilizados em outubro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A estimativa do poder calorífico inferior para o mês de outubro, tabela 17, foi a mais alta determinada até o momento, podendo estar entre 4.553,51 kcal/kg e 4.927,20 kcal/kg. A diferença relativa para este cálculo está entre 28,49% e 39,03%, sendo até o momento, os mais distantes da média utilizada. Contudo, neste momento deve-se considerar que os dois resíduos com maior massa possuem alto poder calorífico e que os “demais resíduos” diferente dos outros meses, contribuíram bastante para o cálculo.

Tabela 17 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em outubro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Óleos contaminados	20,59	9.600,00	9.600,00	1.976,33	1.976,33
Borras oleosas	10,60	9.646,00	9.646,00	1.022,53	1.022,53
Resíduo oleoso do poço redondo	7,90	2.078,00	2.078,00	164,09	164,09
Borra ácida	5,67	3.591,00	3.591,00	203,66	203,66
Resíduos de couro	3,18	3.629,00	3.629,00	115,45	115,45
Borra de retifica e filtros	3,03	2.000,00	2.775,00	60,66	84,16
Outros resíduos classe I	2,51	2.000,00	2.775,00	50,13	69,56
Resíduo blend classe I	2,43	2.000,00	2.775,00	48,55	67,36
Tecido contaminado	2,04	3.478,00	3.478,00	71,03	71,03
Varredura de alimentos	1,80	2.000,00	1.311,00	36,07	36,07
Demais resíduos	40,25	2.000,00	2.775,00	805,01	1.116,95
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	4.553,51	4.927,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.11 Cenário 11 – Novembro

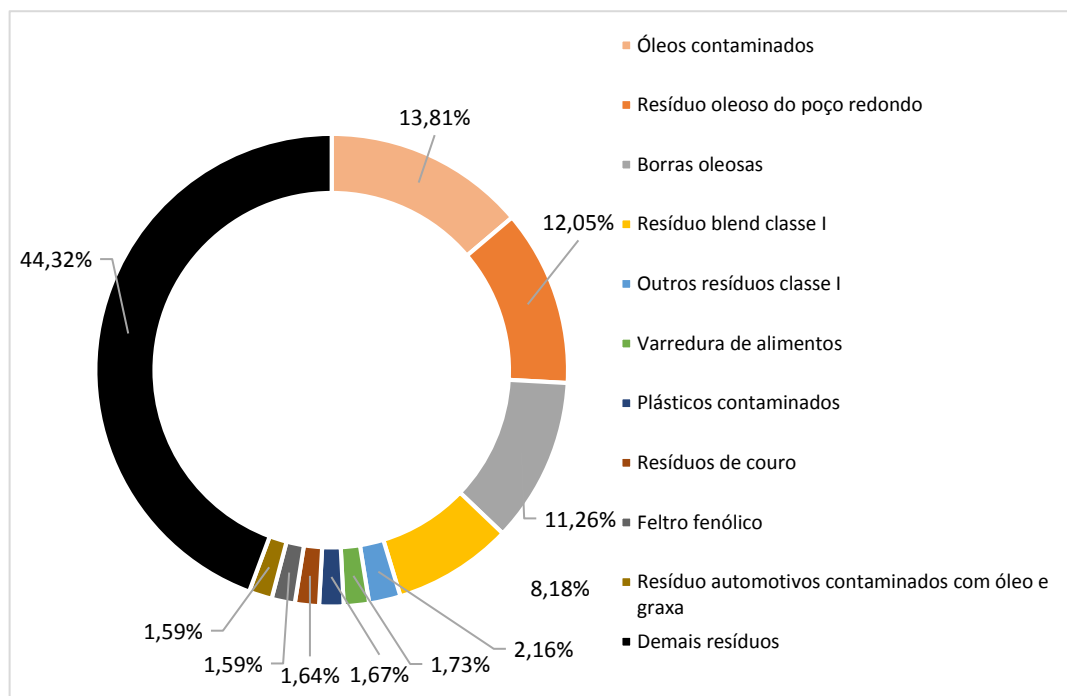
Segundo a análise realizada, como mostra a figura 36, temos um outro perfil dos resíduos. A borra ácida, não está presente entre os resíduos com maior massa pela primeira vez, embora tenha sido recebida em um único dia do mês.

Desta vez, os resíduos com maior massa que tiveram potencial para serem utilizados no *blend* produzido diariamente são: **óleo contaminado**, **borra oleosa**, **plásticos contaminados** e o **feltro fenólico**. Percebe-se que a relação da porcentagem para estes resíduos é similar.

Para os “**demais resíduos**” é observado que houve um crescimento em relação ao mês anterior e a soma se torna predominante em relação aos outros resíduos citados.

Com isso, temos um novo perfil para o estado físico dos resíduos, figura 37, onde os resíduos líquidos e pastosos são mais representativos, em relação ao que era visto.

Figura 36 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em novembro de 2020

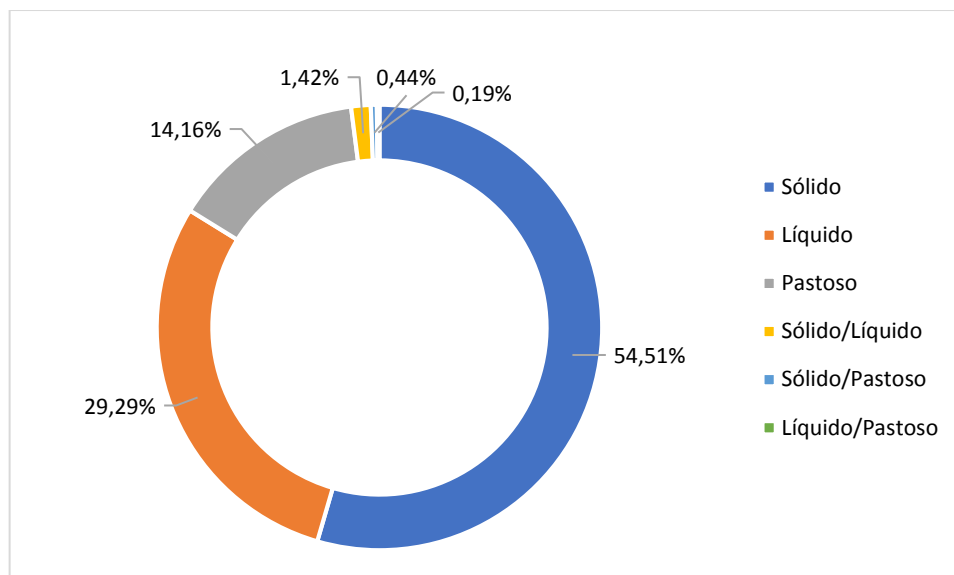


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A estimativa do poder calorífico inferior para o mês de novembro é de 4.042 kcal/kg a 4.478,29 kcal/kg, tabela 18, sendo a diferença relativa de 14,06% a 26,36%.

As maiores contribuições para o poder calorífico foram do **óleo contaminado, borra oleosa e dos demais resíduos**.

Figura 37 - Perfil do estado físico dos resíduos utilizados em novembro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 18 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em novembro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg)	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Óleos contaminados	13,81	9.600,00	9.600,00	1.326,22	1.326,22
Resíduo oleoso do poço redondo	12,05	2.078,00	2.078,00	250,38	250,38
Borras oleosas	11,26	9.646,00	9.646,00	1.086,30	1.086,30
Resíduo blend classe I	8,18	2.000,00	2.775,00	163,54	226,91
Outros resíduos classe I	2,16	2.000,00	2.775,00	43,16	59,89
Varredura de alimentos	1,73	2.000,00	1.311,00	34,60	34,60
Plásticos contaminados	1,67	6.300,00	6.300,00	105,08	105,08
Resíduos de couro	1,64	3.629,00	3.629,00	59,65	59,65
Feltro fenólico	1,59	3.478,00	3.478,00	55,44	55,44
Resíduo automotivos contaminados com óleo e graxa	1,59	2.000,00	2.775,00	31,76	44,06
Demais resíduos	44,32	2.000,00	2.775,00	886,32	1.229,76
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	4.042,44	4.478,29

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

6.1.12 Cenário 12 – Dezembro

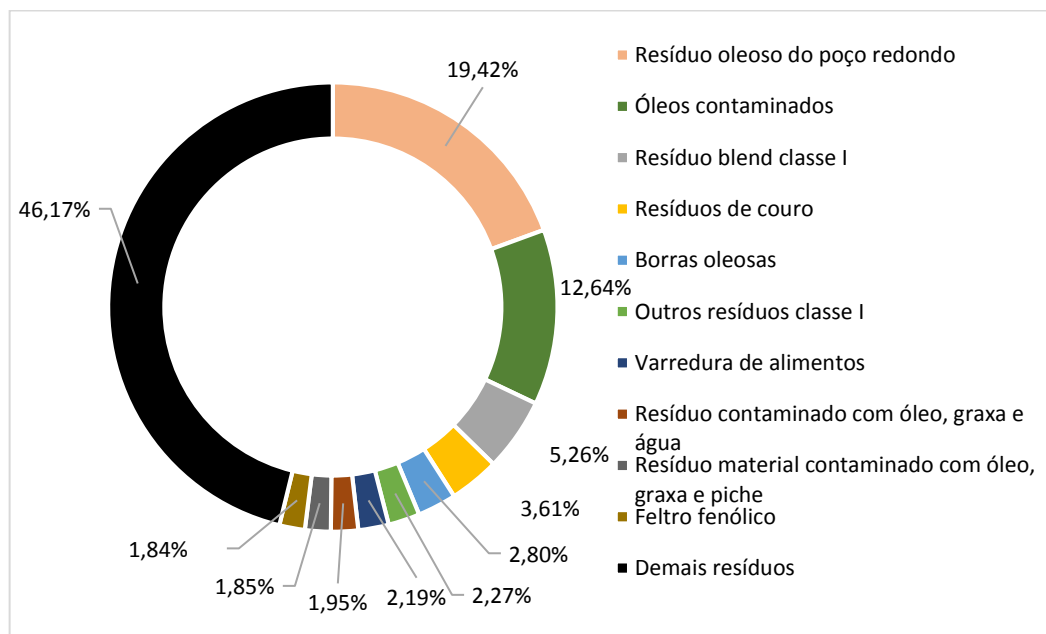
No mês de dezembro o resíduo de borra ácida não foi recebido, o que mostra um cenário diferente dos já apresentados anteriormente.

Os resíduos que podem ter sido utilizados diariamente na produção do *blend*, segundo a figura 38 são: **resíduo oleoso do poço redondo**, **outros resíduos classe I** e o **feltro fenólico**, onde pela primeira vez, o **resíduo oleoso do poço redondo** representa a maior massa. Os **demais resíduos**, no mês de dezembro, representaram a maior porcentagem analisada no ano de 2020, isto é, 46,17%.

Com as mudanças, um outro perfil de estado físico dos resíduos é visto, como mostra a figura 39, onde os resíduos líquidos foram bem representativos no mês.

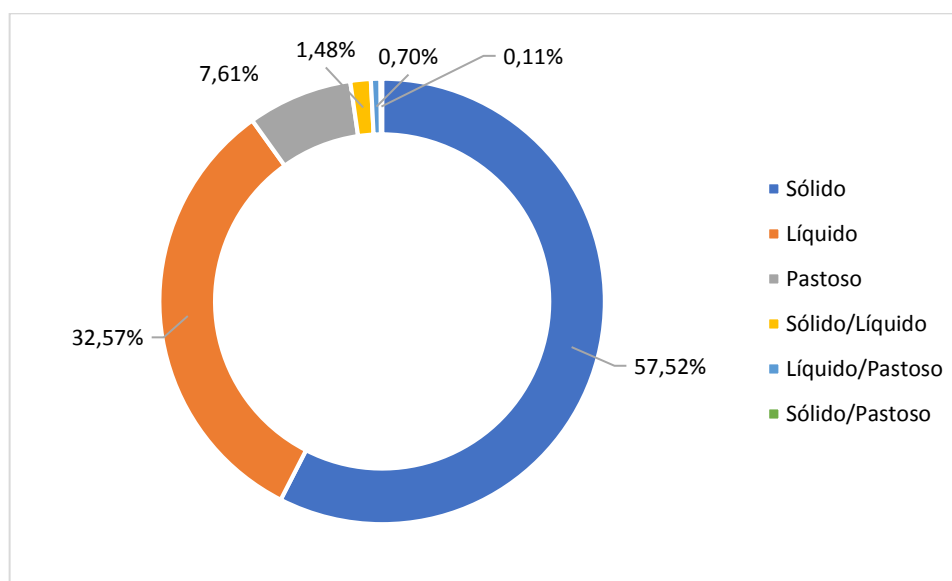
O poder calorífico inferior estimado é de 3.303,67 kcal/kg a 3.766,30 kcal/kg, sendo as maiores contribuições dos **óleos contaminados** e dos “**demais resíduos**”, conforme a tabela 19. A diferença relativa está entre 6,78% e 6,27%.

Figura 38 - Perfil dos 10 resíduos com maior massa em dezembro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 39 - Perfil do estado físico dos resíduos utilizados em dezembro de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

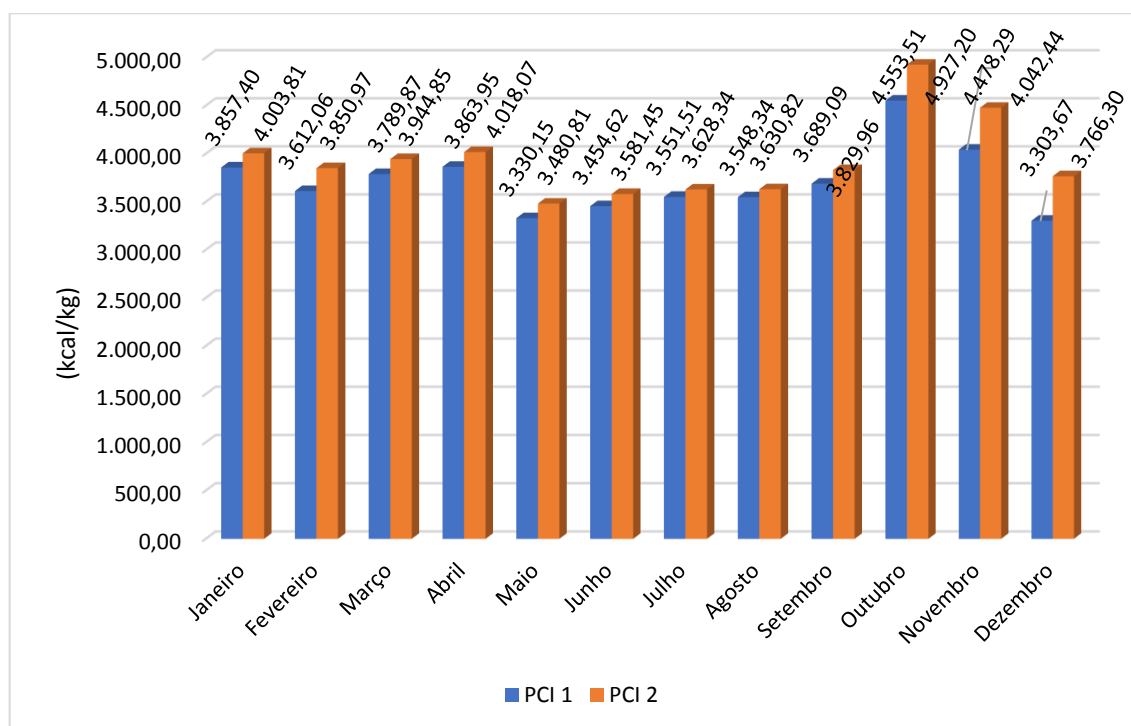
Tabela 19 - Estimativa do poder calorífico inferior do *blend* em dezembro de 2020

Resíduos	Massa (%)	PCI ₁ (kcal/kg)	PCI ₂ (kcal/kg) ²	Total 1 (kcal/kg)	Total 2 (kcal/kg)
Resíduo oleoso do poço redondo	19,42	2.078,00	2.078,00	403,57	403,57
Óleos contaminados	12,64	9.600,00	9.600,00	1.213,49	1.213,49
Resíduo blend classe I	5,26	2.000,00	2.775,00	105,12	145,85
Resíduos de couro	3,61	3629,00	3629,00	131,00	131,00
Borras oleosas	2,80	9.646,00	9.646,00	269,92	269,92
Outros resíduos classe I	2,27	2.000,00	2.775,00	45,46	63,08
Varredura de alimentos	2,19	2.000,00	2.775,00	43,78	60,74
Resíduo contaminado com óleo, graxa e água	1,95	2.000,00	2.775,00	39,09	54,24
Resíduo material contaminado com óleo, graxa	1,85	2.000,00	2.775,00	37,07	51,44
Filtro fenólico	1,84	5.000,00	5.000,00	91,81	91,81
Demais resíduos	46,17	2.000,00	2.775,00	923,37	1.281,17
			Resultado 1 e 2 (kcal/kg):	3.303,67	3.766,30

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Finalizado todos os cenários, a figura 40, mostra a estimativa do poder calorífico no ano de 2020. Onde é visto que o poder calorífico estimado, de modo geral, está entre a faixa de 3.000 kcal/kg e 4.000 kcal/kg. Em apenas 2 meses foi observado valores acima de 4.100 kcal/kg.

Figura 40 - Estimativa do poder calorífico inferior dos *blends* produzidos na empresa A em 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Comparando o poder calorífico inferior estimado com as legislações citadas, não é observado nenhum valor abaixo dos limites aceitáveis. Isto ocorreu devido as considerações feitas para alguns resíduos, tabela 5, onde o valor do poder calorífico inferior considerado foi o mínimo aceitável. Em contrapartida sabemos que alguns desses resíduos podem apresentar valores inferiores ao mínimo aceitável e que atualmente o órgão ambiental competente pode aprovar o uso de resíduos nessas condições desde que seja comprovado o ganho ambiental.

Durante a pesquisa foi levantado um questionamento se a estimativa do poder calorífico inferior teria alguma relação com a demanda energética da produção de cimento. Seguindo este questionamento os dados da figura 40 podem ser comparados com os dados da figura 3, visto que a estimativa realizada é referente a empresa A que destina os *blends* para cimenteiras no estado de Minas Gerais.

Neste sentido, não é observado uma semelhança clara para afirmar esta relação, uma vez que as altas produções de cimento ocorreram principalmente nos meses de maio a novembro, considerando o estado de Minas Gerais. Por fim, somente

a empresa A não seria suficiente para confirmar o questionamento proposto, ainda que houvesse uma proximidade dos dados.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria do cimento no Brasil conta com um grande polo industrial. A região sudeste ainda é a região com o maior número de indústrias cimenteiras no país, com destaque para o estado de Minas Gerais.

No Brasil, em 2020 foi constatado que do consumo total de energia na indústria do cimento, 86,6% correspondem a energia térmica. No processo de produção do cimento, a etapa que mais demanda este tipo de energia é a formação do clínquer, que foi responsável por 83,3% do consumo total de energia térmica em 2019.

É visto também que ao decorrer dos anos, a indústria brasileira do cimento tem aumentado a sua eficiência energética e diminuído o consumo de energia gasto para produzir o clínquer.

Uma outra evolução, é a proporção de combustíveis utilizados nos fornos rotativos clínquer. No final da década de 90 era visto que esta utilização alcançava em média, 90% de combustível fóssil e 10% de combustível alternativo. Atualmente, essa proporção é de 72% de combustível fóssil e 28% de combustível alternativo. Dos 28%, 15% são compostos por *blends*.

A intenção da indústria é que essa proporção seja ainda mais diferente até 2050, com a redução da utilização de combustíveis fósseis e aumento dos combustíveis alternativos. Com isso a proporção estimada é de 45% de combustível fóssil e 55% de combustível alternativo. Possivelmente este valor pode ser alcançado, visto que a estimativa do uso de combustíveis alternativos para 2030 é de 35% e o atual valor é de 28%, restando apenas 7 anos para ser atingido.

Dos combustíveis alternativos utilizados, o *blend* tem assumido um papel importante nesta corrida, ficando atrás apenas dos pneus inservíveis. A utilização dos *blends* é representativa no cenário atual, uma vez que entre todos os combustíveis alternativos utilizados na produção do clínquer, o *blend* representa 39,58%.

O coprocessamento se apresenta como uma tecnologia ambientalmente adequada. Contudo, é visto que o ato do coprocessamento de resíduos pode causar danos ao meio ambiente, à saúde humana e principalmente dos trabalhadores envolvidos nas atividades, incluindo os das unidades de mistura e preparo do *blend*.

O termo “ambientalmente adequado” no caso do coprocessamento está relacionado com as vantagens que a técnica apresenta: aproveitamento do conteúdo energético dos resíduos, aumento da vida útil dos aterros, preservação de recursos naturais, redução dos gases de efeito estufa e passivo ambiental. Além disso, pode se considerar que, até que não se atinja os limites estipulados na legislação, o processo ocorreu de forma ambientalmente adequada.

Com o avanço do emprego de combustíveis alternativos na indústria do cimento, há um bom tempo já se aguardava adequações na legislação brasileira, que só ocorreu após 20 anos.

Os principais pontos das alterações foram: o aumento dos resíduos que podem ser coprocessados, a permissão no uso de resíduos de serviço de saúde e de embalagens de agrotóxicos, o desaparecimento da seção que tratava sobre as UMPCR - Unidades de Mistura e Pré-Condicionamento de Resíduos e um dos pontos que mais chama atenção e trouxe questionamentos que foi a exclusão de diversos resíduos do licenciamento.

Além destes, as modificações apresentadas na atual legislação aumentam a gama de resíduos que podem ser coprocessados. Com isso, o futuro cenário do coprocessamento pode alcançar mais rapidamente, as proporções projetadas para os próximos anos, caso as unidades de mistura e as indústrias cimenteiras adotem os novos resíduos.

Outro ponto de destaque na legislação é a utilização de resíduos que não apresentam ganho energético para a técnica, mas que podem ser incluídos nas como ganho ambiental ou em que o coprocessamento se mostra como uma técnica mais adequada. Relativamente, esta prática já é vista em alguns estados, onde, um resíduo que não possui o poder calorífico mínimo, pode ser utilizado, desde que comprovado seus benefícios para sua utilização.

É importante considerar em relação às unidades de produção do *blend*, que a análise dos resíduos recebidos poderia se dar de forma mais constante e ser incluída na legislação federal, visto que a operação no processo de produção do *blend* não ocorre de forma automatizada, expondo os trabalhadores a certos riscos de saúde.

Sobretudo, somente o acompanhamento do coprocessamento ao decorrer dos anos, irá demonstrar se as modificações feitas contribuirão positivamente para o setor.

Em relação aos resíduos utilizados como combustível alternativo, não é visto uma mudança considerável entre os resíduos relatados em 1993 e os que são utilizados pela empresa A em 2020. No geral, são resíduos petroquímicos, siderúrgicos, de ETE e de materiais contaminados. Esta relação pode apresentar alterações nos próximos anos, considerando a nova gama de resíduos permitidos na legislação vigente, resolução CONAMA nº 499/2020. Contudo, ressalto que esta afirmação é descrita considerando somente a empresa A, ou seja, se uma outra empresa fosse analisada, o cenário poderia ser diferente.

Quanto às análises realizadas na empresa A, os resíduos com maior massa que foram os mais utilizados para a produção dos *blends* foram, a borra ácida, lodo de ETE, óleos contaminados, plásticos contaminados, resíduos automotivos contaminados com óleo e graxa, feltro fenólico, borra oleosa e “outros resíduos classe I”.

Destes resíduos, pode se dizer que a borra ácida, o lodo de ETE e os óleos contaminados são uma espécie de base no *blend* produzido pela empresa A. Sendo a borra ácida e o óleo contaminado, os resíduos que mais contribuem no poder calorífico. Diante disso, os principais clientes da empresa A são os das indústrias: siderúrgica, automotiva e de bebidas.

A estimativa do poder calorífico inferior para os *blends* da empresa A é de 3.288,59 kcal/kg a 4.553,51, considerando o PCI mínimo de 2.000 kcal/kg e de 3.480,81 a 4.927,20 kcal/kg considerando o PCI mínimo de 2.775 kcal/kg.

O uso dos resíduos sólidos é predominante em todos os meses analisados. Em sequência observa-se o uso dos líquidos e pastosos.

Nos meses em que se obteve a maior estimativa do poder calorífico inferior, outubro e novembro, os resíduos líquidos representaram aproximadamente 30%, e que os principais resíduos utilizados nestes meses possuem alto poder calorífico. Além disso, deve ser levado em consideração que a diferença relativa para estes foram os maiores encontrados no ano.

PROPOSTAS FUTURAS

- Avaliar se haverá redução nas emissões de gases poluentes, bem como dos custos, melhorias na eficiência energética
- Realizar uma nova análise gravimétrica na empresa A, para avaliar se houve mudanças no perfil do *blend*.
- Acompanhar a evolução do uso de combustíveis alternativos, principalmente do *blend*, na indústria brasileira do cimento.
- Verificar a utilização dos novos resíduos liberados na legislação atual pelas unidades de mistura do *blend*.
- Realizar a caracterização dos principais resíduos com maior massa.
- Analisar os elementos presentes em amostras de *blends*, através da análise por ativação neutrônica
- Selecionar e analisar um *blend* majoritariamente formado pelos resíduos declarados como base.
- Avaliar o aumento no uso de resíduos líquidos no *blend*

REFERÊNCIAS

ABCP. **Panorama do coprocessamento – Brasil 2015 (ano base 2014)**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://bps.com.br/abcp/panorama/files/assets/basic-html/index.html#6>. Acessado em: 12 de março de 2020.

ABCP. **Panorama do coprocessamento – Brasil 2016 (ano base 2015)**. São Paulo, 2015.

ABCP. **Panorama do coprocessamento – Brasil 2017 (ano base 2016)**. São Paulo, 2016. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Panoramaco_processamento_2017_REV22.11.pdf. Acessado em: 12 de março de 2020.

ABCP. **Panorama do coprocessamento – Uma tecnologia sustentável 2021 (ano base 2020)**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2021/12/Panorama_Coprocessamento_2021_Ano_Base_2020.pdf. Acessado em 21 de dezembro de 2021.

ABCP. **Panorama do coprocessamento 2019 (ano base 2017)**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/download/?search=Coprocessamento#Dload>. Acessado em 12 de março de 2020.

ABCP. **Panorama do coprocessamento 2020 (ano base 2018)**. São Paulo, 2020^a. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2020/10/Panoramaco_processamento_2020_bx.pdf. Acessado em: 17 de abril de 2021.

ABCP. **Panorama do coprocessamento 2020 (ano base 2019)**. São Paulo, 2020^b. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2020/12/Panorama_coprocessamento_2020_v3_Base_2019.pdf. Acessado em: 17 de abril de 2021.

ABCP. **Resolução Conama 499/20: Nova resolução federal sobre coprocessamento reflete adequação da legislação ao conceito de economia circular e uso sustentável dos recursos naturais**. (c). Disponível em: <https://abcp.org.br/resolucao-conama-499-20-2/>. Acessado em 16 de fevereiro de 2021. Acessado em 20 abril 2022.

ABNT. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro - RJ, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

AGUIAR, Barreto de, D., MATTOS, D. U. A. O., e ESTEVES, V. P. P. **Impactos ambientais regionais decorrentes da mudança da legislação ambiental para coprocessamento de agrotóxicos**. *Sistemas & Amp; Gestão*, 16 (3), v. 16, n 3. 1743 (2022). Disponível em: <https://revistasg.emnuvens.com.br/>

ALENCAR, Emanuel. **Nova regra deixará trabalhadores da cadeia do cimento mais expostos a poluentes perigosos**. *O Eco*. 5 de outubro de 2020. Disponível em: <https://oeco.org.br/reportagens/nova-regra-deixara-trabalhadores-da-cadeia-do-cimento-mais-expostos-a-poluentes-perigosos/>. Acessado em: 10 dezembro de 2021.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2011.

BORGES, Fabricio, SELLIN, Noeli e MEDEIROS, Sandra. **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia**. Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal) ISSN 0103-944X. PP. 30. 2009. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/277059638_CHARACTERIZACAO_E_AVALIACAO_DE_LODOS_DE_EFLUENTES_SANITARIO_E_INDUSTRIAL_COMO_BIOMASSA_NA_GERACAO_DE_ENERGIA?enrichId=rgreq-fbc1f910dfcc8a1e09fa1821ae0d7c11-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzI3NzA1OTYzODtBUzoyNjY3NTQ4NzgzNDExMjBAMTQ0MDYxMDcyNzQ1Nw%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf. Acessado em 25 de abril de 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n.147, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 264 de 26 de agosto de 1999**. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n.54, 20 mar. 2000.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 499, de 6 de outubro de 2020**. Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n.195, 9 out. 2020.

CBIC. **Produção mensal de cimento – por UF, grandes regiões e total Brasil**. Disponível em:

http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/tabela_07.A.04_Produ%C3%A7ao_cimento_30.xlsx. Acessado em: 13 de fevereiro de 2022.

CEMA. **Resolução nº 76 de 30 de novembro de 2009**. Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético. Paraná, 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=144181>. Acessado em: 05 de abril de 2020.

CEMBUREAU. **Cement**. Disponível em: <https://cembureau.eu/about-ourindustry/cement/>. Acessado em: 12 de agosto de 2020.

CEMBUREAU. **Activity report 2021**. June, 2021. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/03cgodyp/2021-activity-report.pdf>. pp.41. Acessado em: 25 de junho de 2021.

CETESB. **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer - Norma técnica P4.263**. São Paulo, 2003. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_263.pdf. Acessado em 03 de abril de 2020.

CONSEMA. **Resolução nº 02/2000**. Dispõe de norma sobre o licenciamento ambiental para coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Rio Grande do Sul, 2000. Disponível em:

<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201611/30095238-resolucao-002-2000-publicada.pdf>. Acessado em: 04 de abril de 2020.

CORBITT, Robert A. **Standard Handbook of Environmental Engineering**. Editora: McGraw-Hill. New York, 1999. 2ª ed. Pp. 8.86.

EMPRESA B1. **Licenciamento Ambiental (Co-processamento de Resíduos em forno de clínquer)**. 2017.

EPE. **Atlas da eficiência energética – Brasil 2020**. Rio de Janeiro, 2020. pp.43. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf. Acessado em: 12 de maio de 2021.

EPE. **Balanço energético Nacional 2022 (ano base 2021)**. Rio de Janeiro, 2022. pp. 85. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acessado em: 18 de junho de 2022.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 18/14 - Inventário energético dos resíduos sólidos urbano**. Rio de Janeiro: outubro, 2014. Pp. 25. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acessado em 13 junho de 2022.

HOLCIM e GTZ. **Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production**. 2006. pp. 16, Disponível em: https://www.geocycle.com/sites/geocycle/files/atoms/files/coprocessing_supporting_document_giz-holcim_guidelines.pdf. Acessado em 05 de junho de 2020.

INDÚSTRIA HOJE. **Como é produzido o cimento?**. 13 Abr. 2014. Disponível em: <https://industria hoje.com.br/fabricacao-de-cimento>. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

INEA. **DIRETRIZ-1314.R-0**. Diretriz para licenciamento de processos de destruição térmica de resíduos. Rio de Janeiro, 1993^b. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zwff/mda3/~edisp/inea_007129.pdf. Acessado em 03 de abril de 2020.

INEA. **Instrução de Técnica -1315.R-0**. Instrução técnica para requerimento de licenças para unidades de destruição térmica de resíduos. Rio de Janeiro, 1993^a. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/11/IT-1315.R-0.pdf>. Acessado em 03 de abril de 2020.

KATHIRAVALE, S., YUNUS, M. N. M., SOPIAN, K., SAMSUDDIN, A.H. e RAHMAN, R.A. **Modeling the heating value of Municipal Solid Waste**. Fuel, Volume 82, Issue 9, 2003, Pages 1119-1125, ISSN 0016-236. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236103000097>. Acessado: 23 de fevereiro de 2022.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011.39 f. monografia de especialização (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9C6HHC>. Acessado em: 12 de agosto de 2020.

LIMA, Cicero de Souza. **Pirólise de borras oleosas de petróleo utilizando nanomateriais**. 2014. 145 f. pp.110. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/13030/1/Pir%C3%B3liseBorrasOleosas_Lima_2014.pdf. Acessado em 13 junho de 2022.

MADLOOL, N.A. *et al.* **A critical review on energy use and savings in the cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 4, 2011. Pages 2042-2060. ISSN 1364-0321. pp. 2044. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000207>. Acessado em: 17 de agosto de 2020.

MALARD, A. A. M. **Avaliação Ambiental do Setor de Coprocessamento no Estado de Minas Gerais**. In: MALARD, Antônio Augusto Melo. Emissão de poluentes e seu controle no coprocessamento: Metais, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016, f. 111 e 112. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/321658/1/Malard_AntonioAugustoMelo_D.pdf. Acessado em: 8 de outubro de 2020.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, pp. 4,6,22,99. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-16022006-132935/pt-br.php>. Acessado em 03 de junho de 2020.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 264, de 25 de agosto de 2010**. Dispõe sobre o Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Diário Executivo de Minas Gerais. 04 de setembro de 2010.

MINAS GERAIS. **Deliberação normativa copam nº 213, de 22 de fevereiro de 2017**. Regulamenta o disposto no art. 9º, inciso XIV, alínea “a” e no art. 18, § 2º da Lei Complementar Federal nº 140, de 8 de dezembro de 2011, para estabelecer as tipologias de empreendimentos e atividades cujo licenciamento ambiental será atribuição dos Municípios. Diário Executivo de Minas Gerais. 24 de fevereiro de 2017.

OLADE. **Energy statistics manual**. 1.ed. ISBN 978-9978-70-122-5. Quito, 2017. Pp.24. Disponível em: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0381.pdf>. Acessado em: 20 de março de 2022.

Receita Federal. **Destruição de mercadorias apreendidas**. 2021^b. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/historico/srf/boaspraticas/MercadoriasApreendidas/Destruicao.htm>. Acessado em 20 fevereiro de 2021.

Receita Federal. **Doações e Incorporações**. 2021^a. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/historico/srf/boaspraticas/mercadoriasapreendidas/Doacoes.htm>. Acessado em 20 fevereiro de 2021.

Receita Federal. **Leilões**. 2021^c. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/historico/srf/boaspraticas/mercadoriasapreendidas/Leiloes.htm>. Acessado em 20 fevereiro de 2021.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira, LINS, Vanessa de Freitas Cunha e SANTO, Belinazir Costa do Espírito. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**. Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2011, v. 16, n. 1. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a03v16n1.pdf>. Acessado em: 22 de abril de 2020.

S. D. F. Rocha, V. de F. C. Lins, e B. C. do E. Santo. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em forno clínquer**. Belo Horizonte, 2011. v.16. n.1. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a03v16n1.pdf>. Acessado em 22 de abril de 2020.

SANTI, Auxiliadora Maria Moura. **Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer: investigação no maior polo produtor de cimento do país, região metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para segurança química**. 2003. 227p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. pp.24 e 34. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1594526>. Acessado em: 05 de junho de 2021.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. **Mudança no suprimento industrial e disseminação dos riscos de contaminação: pesquisa sobre a co-incineração de resíduos perigosos em fábricas de cimento**. In: Congresso Brasileiro de Energia, 10., 2004, Rio de Janeiro. X Congresso Brasileiro de Energia, 2004. p.1682-1716. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/1294>. Acessado em: 10 de novembro de 2022.

SOUZA, H. & Peixoto Soares Jr, Atílio & Junior, Esly & Costa, Andréa. (2015). **Predição da composição do clínquer industrial utilizando minimização da energia livre de Gibbs**. Cerâmica. 61. 23-30.. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279159733_Predicao_da_composicao_do_clinquer_industrial_utilizando_minimizacao_da_energia_livre_de_Gibbs. Acessado em: 14 de agosto de 2020.

SANTOS, Elio Lopes dos. *et al.* **Parecer sobre a proposta de resolução CONAMA nº499 de 2020 que dispõe sobre licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer**. Santos, São Paulo, 10 novembro 2020. Disponível em: https://acpo.org.br/wp-content/uploads/2020/11/parecer_resolucao_499_2020.pdf. Acessado em 16 fevereiro de 2021.

SANTOS, F. O. dos. **Coprocessamento e a Contaminação Ambiental – Perspectiva para a Saúde Ambiental**. Curitiba: Appris, 2015.

SANTOS, R. S., SOUZA, G. P. e HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural**. Cerâmica. Pp.115-120. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/ccQNPsfDQm9jNkyfFZ3NtFH/?format=pdf&lang=pt.sg/article/view/1743> . Acessado em 10 de julho de 2022.

SIAM. **Aba de pesquisa sobre informações dos empreendimentos** Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>. Acessado em 02 junho de 2021.

SIAM. **Página inicial**. Disponível em: www.siam.mg.gov.br/. Acessado em 02 de junho de 2021.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC. **Coprocessamento**. 2021(b). Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>. Acessado em 18 março de 2021.

SNIC. **Dados do setor**. 2021^c. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acessado em: 22 de janeiro de 2022.

SNIC. **Relatório Anual 2020**. 2020^a. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf. Acessado em 12 de dezembro de 2021.

SNIC. **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. Elaborado por Maria Gisele Fonseca de Oliveira. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acessado em: 23 de abril de 2021.

SOUZA, Marcelo Eduardo Alves Olinda de. **Estudo de um processo de combustão de gás total flex para calcinação da Gipsita em regiões remotas**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5564/1/arquivo7616_1.pdf. Acessado em 25 de abril de 2022.

TOSTA, L. I., SOUZA A. C. de e SILVA, R. J. da. **Gestão da energia na produção de cimento portland com uso de mineralizadores e combustíveis alternativos**. In: XXVII ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu, PR, Anais: A energia que move a produção: um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade, Paraná: ABEPRO, 2007. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_TR650480_0311.pdf. Acessado em 11 de maio de 2020.

U.S. Geological Survey. **Cement statistics and information**. January, 2021. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>. pp.2. Acessado em 10 de junho de 2021.