

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

CAMPUS SOROCABA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE  
RECURSOS RENOVÁVEIS

LEONARDO MOREIRA DE LIMA

**APLICAÇÃO INDUSTRIAL DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE  
DE ENERGIA ALTERNATIVA NA PRODUÇÃO DO CIMENTO**

Sorocaba

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

CAMPUS SOROCABA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE  
RECURSOS RENOVÁVEIS

LEONARDO MOREIRA DE LIMA

**APLICAÇÃO INDUSTRIAL DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE  
DE ENERGIA ALTERNATIVA NA PRODUÇÃO DO CIMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis para obtenção do título de Doutor em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Linha de Pesquisa: Energia de Biomassa

Orientador: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Coorientadora: Dra. Gabriela Bertoni Belini

Sorocaba

2024

Moreira de Lima, Leonardo

Aplicação industrial do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia alternativa na produção do cimento / Leonardo Moreira de Lima -- 2024.

71f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Fábio Minoru Yamaji

Banca Examinadora: Carlos Roberto Sette Jr, Cristiane Ignácio de Campos, Luiz Carlos de Faria, Robmilson

Simões Gundim

Bibliografia

1. Resíduo de biomassa da cana-de-açúcar. 2. Coprocessamento energético. 3. Viabilidade técnica e teste industrial. I. Moreira de Lima, Leonardo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

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



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Leonardo Moreira de Lima, realizada em 18/03/2024.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos (UNESP)

Prof. Dr. Carlos Roberto Sette Junior (UFG)

Prof. Dr. Luiz Carlos de Faria (UFSCar)

Prof. Dr. Robmilson Simões Gundim (SENAI)

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

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha filha MS Lima e minha esposa JTS Lima, que compreenderam o tempo que estive ausente do convívio familiar para me dedicar a este trabalho.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço ao meu gestor Maurício, por essa oportunidade de crescimento profissional e pela confiança depositada nesta empreitada, aos professores que dedicaram tempo e atenção durante minha permanência no campus, em especial ao Doutor Fabio Minoru Yamaji que depositou imensa confiança desde o primeiro momento e sempre que solicitado, foi solidário com sua imensa expertise. Também agradeço aos colegas de profissão, Alício, José Roberto, Lineu, Eliezer, Vicente, Brito, José Roberto e Vitti, pelas conversas relacionadas ao tema, sem as quais, aumentaria significativamente o tempo na busca de informações para realização deste trabalho. E evidentemente, não menos importante, a minha esposa, Juliana, que me apoiou e ficou sempre ao meu lado.

*“How lucky am I to have something that makes saying goodbye so hard”.*

*A. A. Milne*

## RESUMO

LIMA, Leonardo Moreira de. APLICAÇÃO INDUSTRIAL DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA NA PRODUÇÃO DO CIMENTO, 2024. Tese de Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2024.

Dentre os custos envolvidos na produção de cimento, o consumo de energia merece destaque como um dos fatores mais relevantes no custo de produção. A busca por fontes de combustíveis oriundos de fontes alternativas pode ser uma solução para diminuir a dependência do uso de combustíveis fósseis. O objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade do coprocessamento pela queima do bagaço da cana-de-açúcar em um pré-calcinador. Foram utilizadas aproximadamente 98 toneladas de bagaço da cana-de-açúcar como combustível alternativo. O teste em escala industrial foi monitorado por 16 horas. A vazão média de alimentação no pré-calcinador foi de aproximadamente 6 toneladas por hora de bagaço de cana-de-açúcar, combinadas com 7,8 toneladas por hora de coque de petróleo. Os resultados mostraram que a substituição térmica de parte do combustível fóssil (17%) pela biomassa da cana-de-açúcar, não teve um impacto significativo na qualidade do material produzido. O uso deste resíduo como combustível alternativo possibilitou uma redução nos custos relacionados ao combustível fóssil de R\$ 1.067/hora. Estimando que o equipamento permaneça em operação durante 10 meses, isso representaria uma economia de R\$ 7.679.160/ano. O bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizado como co-combustível em pré-calcinador, sem reduzir o desempenho do equipamento e sem alterar as propriedades da farinha, e como consequência, as propriedades do clínquer e do cimento Portland produzido.

Palavras-chave: Resíduo, coprocessamento, Substituição térmica e Cimento Portland.

## ABSTRACT

LIMA, Leonardo Moreira de. INDUSTRIAL APPLICATION OF SUGAR CANE BAGASSE AS AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE IN CEMENT PRODUCTION, 2024. Doctorate Thesis in Planning and Use of Renewable Resources – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2024.

Among the costs involved in cement production, energy consumption deserves to be highlighted as one of the most relevant factors in the production cost. The search for fuel sources from alternative sources can be a solution to reduce dependence on the use of fossil fuels. The objective of this work was to study the feasibility of co-processing by burning sugarcane bagasse in a pre-calciner. Approximately 98 tons of sugarcane bagasse were used as an alternative fuel. The industrial-scale test was monitored for 16 hours. The average feed flow into the pre-calciner was approximately 6 tons per hour of sugarcane bagasse, combined with 7.8 tons per hour of petroleum coke. The results showed that the thermal replacement of part of the fossil fuel (17%) by sugarcane biomass did not have a significant impact on the quality of the material produced. The use of this residue as an alternative fuel enabled a reduction in costs related to fossil fuel of R\$1,067/hour. Estimating that the equipment remains in operation for 10 months, this would represent savings of R\$ 7.679.160/year. Sugarcane bagasse can be used as co-fuel in a pre-calciner, without reducing the performance of the equipment and without altering the properties of the flour, and as a consequence, the properties of the clinker and Portland cement produced.

Keywords: Waste, co-processing, Thermal Replacement and Portland Cement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cimento Portland .....	17
Figura 2: Representação simplificada do processo de produção de cimento a seco. ....	17
Figura 3: Distribuição Regional da Produção de Aço Bruto em 2017 .....	21
Figura 4: Sistema Pré-Aquecedor, Pré-Calcinador e Forno Rotativo de Clínquer.....	27
Figura 5: Evolução do coprocessamento de pneus.....	30
Figura 6: Alimentação de pneu no processo.....	30
Figura 7: Formação dos compostos do clínquer num forno de cimento .....	37
Figura 8: Amostragem para caracterização do bagaço de cana-de-açúcar diretamente do monte .....	39
Figura 9: Estufa de bancada projetada para operações de secagem e esterilização, com faixa de temperatura ajustável de 50°C a 250°C. ....	40
Figura 10: Fluxo ilustrativo da alimentação de biomassa. ....	41
Figura 11: Balança analítica de precisão e forno elétricos tipo Mufla .....	41
Figura 12: Preparação da amostra para ensaios em bomba calorimétrica digital.....	42
Figura 13: Bomba calorimétrica Parr Modelo 6200 controlada por microprocessador .....	43
Figura 14: Montagem da tampa da bomba calorimétrica digital.....	43
Figura 15: Disposição das peneiras utilizadas nas duas etapas de ensaios.....	46
Figura 16: Analisador termogravimétrico Perkin Elmer .....	46
Figura 17: Preparação e análise de pastilha prensada via DRX e FRX.....	48
Figura 18: Corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para análise das resistências.....	49
Figura 19: Variação de preços do bagaço de cana-de-açúcar em três Estados produtores .....	50
Figura 20: Curvas (a) TG e (b) DTG do bagaço de cana-de-açúcar.....	54
Figura 21: Alimentação do bagaço da cana-de-açúcar no Pré-Calcinador.....	56
Figura 22: Registro da variação de temperatura durante a substituição térmica.....	57
Figura 23: Temperatura de calcinação em função da pressão parcial de CO <sub>2</sub> na corrente gasosa .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição típica do clínquer expressa em óxidos.....	18
Tabela 2: Requisitos químicos.....	22
Tabela 3: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	24
Tabela 4: Propriedades químicas e físicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. ....	25
Tabela 5: Composição química das matérias-primas (% em massa).....	26
Tabela 6: Análise comparativa de combustíveis .....	28
Tabela 7: Relação de substituição de combustíveis fósseis por materiais residuais em países europeus selecionados. ....	29
Tabela 8: Composição química e poder calorífico do RSU e CDR .....	32
Tabela 9: Propriedades das farinhas de origem animal .....	33
Tabela 10: Principais propriedades da Farinha Crua e Lodo de Esgoto.....	34
Tabela 11: Análise da palha e do bagaço da cana-de-açúcar em fração de massa seca de material .....	36
Tabela 12: Análise de umidade do bagaço da cana-de-açúcar em base seca .....	50
Tabela 13: Características físico-químicas do BCA.....	51
Tabela 14: Principais óxidos presentes nas cinzas do BCA .....	52
Tabela 15: Granulometria do bagaço de cana-de-açúcar.....	53
Tabela 16: Química dos compostos presentes no cimento produzido durante a pesquisa .....	59
Tabela 17: Requisitos físicos e mecânicos .....	60
Tabela 18: Requisitos químicos.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BCA – Bagaço da cana-de-açúcar

CDR – Combustível Derivado de Resíduo

DRX – Difração de raios X

DTG – Diferencial Termogravimétrica

FCO – Farinhas animais de Carne e Ossos

FOB – Free on board

FP – Fim de pega

FRX – Fluorescência de raios X

GLP - Gás liquefeito de petróleo

H – Teor de hidrogênio

HHV – High Heat Value

IOT - Iron ore tailings

IP – Início de pega

LHV – Low Heat Value

LOI – Loss on ignition

MB – Massa do bagaço cana-de-açúcar

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mf – Massa final

mi – Massa inicial

MN – Massa de cinzas totais

m1 – Massa do recipiente vazio

m2 – Massa do recipiente cheio

N – Teor de cinzas totais

NBR – Norma Brasileira

NBR NM – Norma Brasileira Norma MERCOSUL

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PF – Perda ao fogo

RI – Resíduo insolúvel

RS – Resíduos Sólidos

RSU – Resíduo Sólido Urbano

TDF – Tire derived fuel (Combustível derivado de pneus)

TG – Termogravimetria

TGA – Thermogravimetric Analysis ou Análise Termogravimétrica

U – Umidade

v – Volume do recipiente

$\rho_g$  – Densidade a granel

GEE – Gases do efeito estufa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 CIMENTO PORTLAND .....	17
2.2 ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO .....	20
2.3 MATERIAL POZOLÂNICO .....	21
2.4 MATERIAL CARBONÁTICO .....	23
2.5 MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA .....	24
2.6 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA INDÚSTRIA DO CIMENTO .....	26
2.7 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS (CDR) .....	31
2.8 FARINHAS ANIMAIS DE CARNE E OSSOS (FCO).....	32
2.9 LODO MUNICIPAL OU LODO DE ESGOTO .....	33
2.10 BIOMASSA .....	34
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1 UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	38
3.2 DENSIDADE A GRANEL DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	40
3.3 TEOR DE CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	41
3.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) .....	42
3.5 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	44
3.6 TEOR DE CLORO.....	44
3.7 TEOR DE ENXOFRE.....	45
3.8 GRANULOMETRIA.....	45
3.10 ANÁLISE DIFERENCIAL TERMOGRAVIMÉTRICA (DTG) .....	47
3.11 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS .....	47
3.12 ENSAIOS INDUSTRIAIS .....	47
3.13 REDUÇÃO DE CUSTOS COM COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DA ADOÇÃO DE BAGAÇO.....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1 UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	50
4.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO MATERIAL ANALISADO .....	51
4.3 GRANULOMETRIA.....	53
4.4 ANÁLISE TÉRMICA.....	54

4.5 ENSAIOS INDUSTRIAIS .....	56
4.6 ENSAIOS LABORATORIAIS NO CIMENTO PRODUZIDO .....	59
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos autores dedicaram seus estudos para evidenciar maneiras de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> ou para chamar atenção para os efeitos que esses gases provocavam. Obi, Onyekuru e Orga (2024) destacaram que as alterações climáticas no aquecimento global são desencadeadas principalmente pelas emissões de CO<sub>2</sub> oriundas de centrais elétricas alimentadas a combustíveis fósseis.

Diversos autores apontaram em seus estudos que os gases efeito estufa (GEE) estavam de alguma forma relacionados à queima de combustíveis fósseis, e este fenômeno estava diretamente ligado as mudanças climáticas (Junqueira; Medeiros; Cohim, 2022; Lobato; Rodrigues; Santos, 2021; Aguiar; Fortes; Martins, 2016; Shapiro, 2007). Neste contexto, promover medidas que incentivam substituições térmicas através do uso de combustíveis alternativos, pode ser neste caso, a grande virada que todos almejam.

Prado et al. (2022) apontaram que uma das alternativas para reduzir as emissões de GEE na indústria cimenteira é o uso de combustíveis alternativos por meio do coprocessamento de Resíduos Sólidos (RS) e da utilização de biomassa.

Worrell *et al.* (2001) alertaram para o potencial de substituição térmica na indústria do cimento. Essa substituição não se restringe apenas à matéria-prima, o que mitigaria as emissões provenientes da descarbonatação do calcário, mas abrange também a substituição de combustíveis fósseis. Tal substituição pode contribuir significativamente para toda cadeia produtiva, dado o elevado consumo de energia na indústria cimenteira, estimado em 2% do consumo global de energia primária.

Lima e Stefanutti (2023) realizaram um estudo sobre técnicas de coprocessamento, fontes de combustíveis e o potencial da indústria de cimento na reutilização de resíduos. Estes autores, mapearam 24 grupos industriais no Brasil, totalizando 100 fábricas, das quais, 37 são licenciadas para o coprocessamento, proporcionando uma alternativa segura para a eliminação de resíduos industriais.

O coprocessamento envolve a utilização de resíduos industriais ou urbanos que seriam destinados a aterros, direcionando-os para a queima. Além de contribuir para a mitigação das emissões de carbono, essa possibilidade, também resulta na redução do volume de resíduos que seriam depositados em aterros. Esta prática teve seu primeiro registro na década de 70 e, desde então, tem sido amplamente explorada em regiões como Europa, Estados Unidos e Japão (SNIC, 2019).

De acordo com Bressan (2006), o impulso para o coprocessamento de resíduos no Brasil surgiu durante a crise mundial do petróleo na década de 80 e foi impulsionado pelo programa do governo voltado para a redução do consumo energético, denominado Protocolo do Cimento. Malard (2016) reforça essa perspectiva ao afirmar que, embora a utilização de resíduos na indústria no Brasil remonte à década de 70, o início do coprocessamento de resíduos no país ocorreu na década de 90.

No âmbito legal, cabe ao CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), regulamentar as atividades de coprocessamento de resíduos, e estes, devem obrigatoriamente ser compatíveis aos materiais utilizados na produção de cimento, ou substituir parte do combustível utilizado (Brasil, 2020).

Diversos estudos suportam a legislação e proporcionam melhoria contínua da técnica de coprocessamento. Isso se deve à ampla disponibilidade de resíduos, os quais podem apresentar características energéticas ou serem utilizados como substitutos na composição do clínquer (Rocha; Lins; Santo, 2011). Righi, Variani e Dias (2018) ressaltaram a competitividade em destinar resíduos provenientes da produção de móveis no processo de fabricação de cimento, superando a utilização de aterros na gestão de resíduos dessa indústria.

Segundo Ajala *et al.* (2021), o bagaço de cana-de-açúcar tem sido encontrado em abundância globalmente, por este motivo, vem sendo explorado por pesquisadores para inúmeras aplicações, incluindo energia e sustentabilidade ambiental. Consequentemente, o BCA é uma biomassa com grande potencial para atender à demanda energética global e promover a sustentabilidade.

Campos *et al.* (2021) examinaram a conversão de resíduos em energia, correlacionando a geração e composição de resíduos sólidos urbanos (RSU) com o nível de renda. No início do século XXI, o Brasil descartava quase 60% dos resíduos gerados em locais impróprios, após a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), reduzindo à 18% em 2018.

Dentre os diversos materiais processados para formação do clínquer, o calcário é a principal matéria-prima para sua obtenção, que devidamente moído com outras adições resultam nos diferentes tipos de cimento (Battagin; Cardoso, 2018). O coprocessamento de resíduos consegue preservar as jazidas naturais, pela substituição dos compostos inorgânicos do clínquer, bem como, a redução dos gases de efeito estufa, seja este pela simples redução do

consumo de material carbonático ( $\text{CaCO}_3$ ) ou através do uso de combustíveis alternativos com menor emissão de  $\text{CO}_2$ .

Lagarinhos, Espinosa e Tenório (2016), constataram que 62% das fábricas integradas instaladas no Brasil estavam licenciadas para realizar coprocessamento. De acordo com Prado *et al.* (2022), esse potencial licenciado representa aproximadamente 15% do consumo energético, ao incorporar combustíveis alternativos na matriz energética. Na União Europeia, mais de 48% da energia térmica utilizada no processo de produção de clínquer provém de resíduos de biomassa, considerada a opção mais vantajosa de combustível alternativo. Isso porque as emissões de  $\text{CO}_2$  provenientes da combustão de biomassa são consideradas neutras para o clima, resultando em um fator de emissão zero para esse tipo de material (Uliasz-bochenczyk; Deja; Mokrzycki, 2021).

Outro ponto que merece destaque na destinação definitiva de resíduos, é o impacto social, com geração de renda para as comunidades dentro do perímetro de atuação das fábricas e instalação de cooperativas que realizam o trabalho de triagem do Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

Este estudo se propôs a analisar os impactos decorrentes da queima do bagaço de cana-de-açúcar no processo produtivo de cimento e os potenciais obstáculos que possam surgir na qualidade do cimento produzido.

O objetivo específico deste trabalho se limitou a utilizar o bagaço de cana-de-açúcar durante a etapa de pré-calcinação do calcário, para comprovar a redução de custo gerada pela substituição parcial do combustível fóssil pelo resíduo agrícola. Além disso, avaliou o atendimento normativo do cimento produzido durante o teste.

O ineditismo da tese foi comprovado por uma busca de palavras-chave na base Scopus, utilizando termos como sugarcane, waste, thermal AND replacement, portland AND cement. Foram identificados 6 artigos, mas nenhum destes artigos utilizava o bagaço de cana-de-açúcar diretamente na produção de cimento. Dessa forma, a tese preenche essa lacuna na literatura e explora essa aplicação para o resíduo estudado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um pó cinza finamente moído composto principalmente de silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio que endurece na presença de água (Figura 1).

**Figura 1: Cimento Portland**

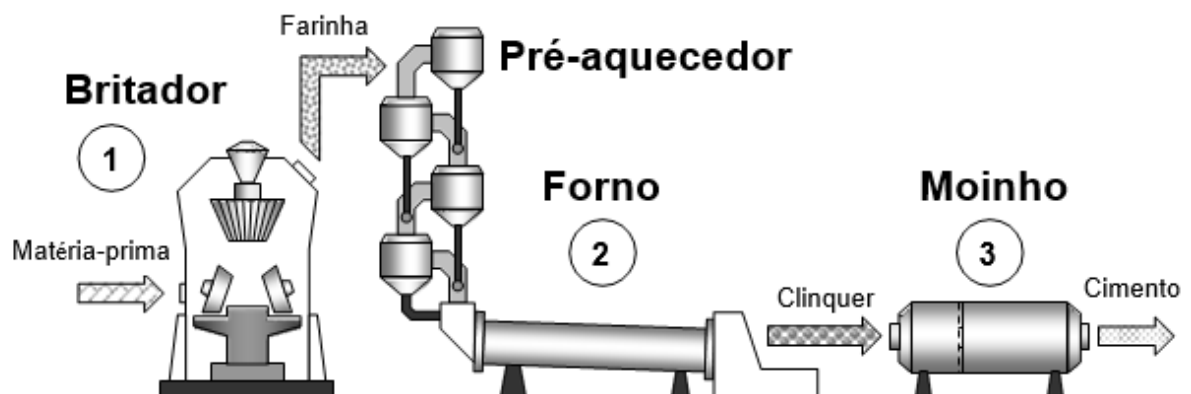


Fonte: Retirado de Mejeoumov, 2007.

O calcário é o principal insumo que fornece CaO, enquanto argila ou xisto são adicionados para fornecer os demais óxidos (Mejeoumov, 2007).

A preparação dos insumos que antecedem a mistura crua denominada farinha envolve diferentes operações, que incluem a extração das matérias-primas, sua preparação, homogeneização, análise, dosagem e posteriormente moagem antes da introdução no forno, exemplificada pela Figura 2. A farinha crua é então aquecida até 1450°C para formar clínquer (Aitcin, 2008).

**Figura 2: Representação simplificada do processo de produção de cimento a seco.**



Fonte: Retirado de Mejeoumov, 2007.

O calcário na presença de outros materiais, como ferro, argila, quartzito e / ou sílica, são moídos juntos para produzir "farinha crua" que posteriormente é fundida para formar o clínquer (Gao *et al.*, 2016; Madlool *et al.*, 2011).

O cimento Portland é produzido pela moagem de uma mistura de clínquer, gesso e adições ativas. Os principais elementos químicos do clínquer são o óxido de cálcio (CaO) e a sílica (SiO<sub>2</sub>), que reagem para formar os silicatos de cálcio, componentes ativos do cimento Portland (da Silva, 1994).

Abdel-Latief *et al.* (2020) destacam que o clínquer de cimento Portland é obtido pela moagem, homogeneização e queima da mistura chamada cru ou farinha, rica em cálcio, silício, alumínio e óxidos férricos. Essa mistura, é submetida a temperaturas de 1450°C, seguido por súbito resfriamento que posteriormente é misturado com 5 a 7% de gesso para fazer o cimento.

A produção do clínquer Portland requer uma proporção adequada dos elementos cálcio, silício, alumínio e ferro, juntamente com as cinzas combustíveis, resulta na composição típica de clínquer conforme a Tabela 1 (Madlool *et al.*, 2011).

**Tabela 1: Composição típica do clínquer expressa em óxidos**

Elementos	Composição (%)
CaO	65 ± 3
SiO <sub>2</sub>	21 ± 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 ± 1,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 ± 1

Fonte: Madlool, et al (2011)

Para Gartner e Sui (2018), o termo clínquer, foi usado para referenciar o material mineral produzido pelo homem que, quando moído, é capaz de reagir com água e produzir uma massa endurecida.

Inúmeros trabalhos destacam a relevância do cimento como um dos materiais de construção mais utilizado na sociedade, mas seu surgimento remonta Leeds, Inglaterra em 1824, quando Joseph Aspdin patenteou sua descoberta, quando percebeu sua semelhança com as rochas da ilha de Portland (Sharp, 2006; Maddalena; Roberts; Hamilton, 2018).

Essa demanda por cimento é justificada pela taxa de urbanização crescente, aliada ao déficit habitacional global, pressionando cada vez mais a produção de cimento, que nos últimos 50 anos, saltou em mais de 4 vezes, alcançando 4,1 bilhões de toneladas em 2017 (Nwankwo *et al.*, 2020).

O cimento produzido, resulta na emissão de 0,85 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer, contribuindo aproximadamente com 7% da geração global de CO<sub>2</sub>, colocando a indústria de cimento na segunda posição de maior geradora de CO<sub>2</sub> (Wi *et al.*, 2018). Em seu trabalho, Rashad (2015), destacou que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) compõe 65% dos gases do efeito estufa (GEE).

Uma parte das emissões de CO<sub>2</sub> é resultante da reação de calcinação do calcário, principal matéria-prima utilizada na produção de cimento, composta principalmente por carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e impurezas como magnésio, silício, alumínio e ferro (Sellitto *et al.*, 2013).

De acordo com Cincotto, Quarcioni e John (2017), calcários são essencialmente formados por carbonatos de cálcio (calcita), entretanto, também são observados outros minerais, como carbonato de magnésio (magnesiano) e carbonato de cálcio e magnésio (dolomita).

Maeda *et al.* (1996), diferencia o calcário com base no teor mássico de magnésio presente, a depender das concentrações de MgO encontradas, são classificados como calcíticos quando a concentração é inferior a 5%, magnesianos quando estão variando entre 5% e 12%, e dolomíticos quando ultrapassam 12%. Algo similar feito por Rodrighero, Barth e Caires (2015), calcítico (25 a 50 g.kg<sup>-1</sup> MgO) e dolomítico (160 a 180 g.kg<sup>-1</sup> MgO).

Oliveira *et al.* (2019) resumiram o processo de clinquerização em um modelo que chamou de zonas simples de reação, representadas pelas Equações de 1 a 5. Posteriormente, com a adição de gesso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), obtém-se o cimento Portland

Zona 1: 2 min, 800–900°C – Decomposição do Carbonato



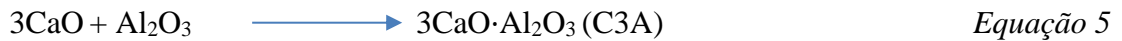
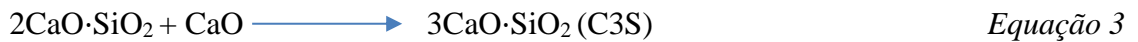
*Equação 1*

Zona 2: 15 min, 900 - 1300°C – Formação de fases de silicato secundário



*Equação 2*

Zona 3: 12 min, 1300–1450°C – Formação de silicatos ternários e ferro aluminato tetracálcio



Zona 4: 2 min, 1450 - 1300°C – Resfriamento e cristalização das diversas fases minerais formadas no forno.

A norma brasileira ABNT NBR 16697 (2018), estabelece os requisitos para o cimento, determina as adições minerais e seus teores permitidos na fabricação de cimento Portland, sendo elas: escória granulada de alto-forno, material pozzolânico e material carbonático.

Neto, De La Torre e Kirchheim (2021), além do gesso destacado por Oliveira *et al.* (2019), nos remete a outras formas de controlar a reação de hidratação do cimento, mais especificamente, a hidratação do C3A, sendo elas: Gipsita ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anidrita natural ( $\text{CaSO}_4$ ) e hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ).

## 2.2 ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO

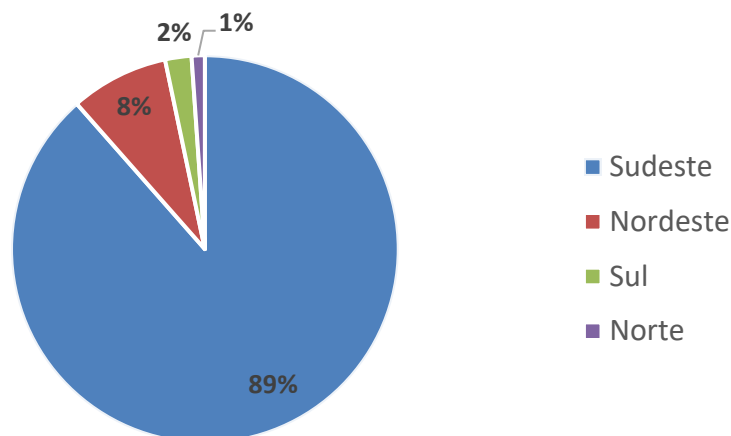
Inúmeros autores se dedicaram ao estudo das contribuições da adição de escória ao cimento Portland. Yalçinkaya e Çopuroğlu (2021) definiram esse material como subproduto da produção do ferro gusa em alto-forno. Para ABNT NBR 16697 (2018), a definição para escória, engloba um subproduto da produção do ferro gusa em alto-forno obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, apresentando uma textura vítrea e composto principalmente por silicatos e alumino-silicatos de cálcio, com aplicação prática na produção de cimento.

Rivera, Sanjuán e Martín (2020), conduziram seus estudos investigativos sobre os efeitos da adição de escória granulada de alto-forno e cinza volante no cimento Portland, suportado pela capacidade hidráulica do material quando finamente moído, destacaram ainda que essas características promovem a durabilidade e a resistência à compressão em longas idades, após 28 dias. Além disso, salientaram a possibilidade de diminuir a dependência de cimentos com baixas adições e alto teor de clínquer, o que poderia conduzir à redução das emissões de  $\text{CO}_2$  na indústria do cimento.

No Brasil, essa substituição por escória, pode alcançar até 75% do clínquer, através do chamado cimento Portland de alto-forno ou CP III (ABNT NBR 16697, 2018). Em casos de substituição real, representaria uma redução imediata nas emissões de CO<sub>2</sub>, como descrito por Oliveira *et al.* (2019) em sua Equação 1. Além disso, haveria uma redução adicional nas emissões originadas da queima de combustíveis fósseis, os quais seriam empregados para gerar energia térmica em cada uma das zonas, conforme descrito pelos mesmos autores, atingindo temperaturas de até 1450°C.

Para Cechin *et al.* (2018), escórias básicas, normalmente geradas em alto-forno, apresentam características adequadas para substituição do clínquer, o que torna a região sudeste do Brasil a maior produtora de cimento CP III, visto que essa região é responsável por aproximadamente 90% da produção nacional de aço, como descrito na Figura 3.

**Figura 3: Distribuição Regional da Produção de Aço Bruto em 2017**



Fonte: Relatório de sustentabilidade. 2018, do Instituto Aço Brasil

### 2.3 MATERIAL POZOLÂNICO

Pozolanas e materiais pozolânicos, representam um grupo de materiais naturais (geralmente de origem vulcânica ou rochas sedimentares) e artificiais (cinzas volantes, provenientes de termoelétricas, sílica ativa e alguns rejeitos agrícolas como cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar) que são usadas para obter ligantes hidráulicos (Tulashie *et al.*, 2021; Mccarthy e Dyer, 2019; Dembovska *et al.*, 2017; Jackson, 1998 e Massazza, 1998)

Berenguer *et al.* (2021), definiram em seu trabalho que material pozolânico é um sistema capaz de reagir com compostos que produzem hidróxido de cálcio, exibindo propriedades cimentícias. Para Frías, Villar e Valencia, (2007), pozolanas são materiais a base de silício

(SiO<sub>2</sub>) e alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com pouca atividade ligante, mas, na sua forma moída, reage com hidróxido de cálcio aquoso para formar compostos que possuem propriedades ligantes.

Tulashie *et al.* (2021), identificaram em seus estudos que resíduos agrícolas, como as cinzas de cascas de arroz, possuem excelentes propriedades pozolânicas, devido à significativa quantidade de sílica amorfa (89,74% - SiO<sub>2</sub>) disponível para reagir com Ca(OH)<sub>2</sub>. Essa quantidade de sílica supera os requisitos químicos estabelecidos pela ABNT NBR 12653 (2014), conforme detalhado no Tabela 2.

**Tabela 2: Requisitos químicos**

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%	ABNT NBR NM 22 (2012)
SO <sub>3</sub>	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%	ABNT NBR 17086-5 (2023)
Teor de umidade	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%	ABNT NBR 17051 (2022)
Perda ao fogo	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%	ABNT NBR 17086-6 (2023)
Álcalis disponível em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5%	≤ 1,5%	≤ 1,5%	ABNT NBR 17052 (2022)

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014)

Sendo as respectivas classes pela referida norma:

- Especificação (Classe N) - Pozolanas naturais;
- Especificação (Classe C) - Cinzas volantes oriundas de usinas termoeletricas;
- Especificação (Classe E) - Pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

## 2.4 MATERIAL CARBONÁTICO

Amplamente disponível, ocupando aproximadamente 5% da crosta terrestre, o calcário, matéria-prima fundamental para produzir o clínquer, também é utilizado como adição do cimento, contribuindo com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Elgalhud; Dhir; Ghataora, 2017).

Neville e Brooks (2013) descreveram fíler ou material carbonático como uma substância finamente moída, com dimensões próximas às do cimento, geralmente inerte, cuja adição é limitada a um valor máximo. Neste caso em especial, não foi especificado qual seria esse limite máximo permitido.

Para os cimentos produzidos no Brasil, o cimento Portland composto apenas com material carbonático (CP II-F), possui uma faixa limite de composição para este material, variando entre 11% e 25% em massa (ABNT NBR 16697, 2018).

Bonavetti *et al.* (2013) chamaram atenção para a substituição de até 35% do cimento Portland por fíler calcário na Europa, e destacaram que essa substituição gerava uma considerável economia de energia e recursos naturais. Outro benefício dessa adição era a produção de efeitos no mecanismo cinético de hidratação, conforme apontado pelos autores, poderia aumentar as resistências iniciais do cimento.

Cada uma das adições minerais previstas pela ABNT NBR 16697 (2018), confere ao cimento características únicas, como: desenvolvimento de resistências mecânicas em elevadas idades, baixo calor de hidratação, resistência ao ataque químico, além de economizar energia térmica e reduzir o custo de produção, na Tabela 3 estão descritos os limites normativos.

**Tabela 3: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)**

Designação normalizada	Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
Cimento Portland comum	CP I-S	90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno	CP III	25 - 65	0	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland branco - Estrutural	CPB	75 - 100	0	0	0 - 25
Cimento Portland branco - Não estrutural	CPB	50 - 74	0	0	26 - 50

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

## 2.5 MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA

Chatterjee e Sui (2019) destacaram o salto evolutivo ocorrido na técnica de coprocessamento de resíduos em fornos de cimento desde seu surgimento na década de 80. A técnica, que inicialmente foi adotada como uma medida de redução de custos, evoluiu para uma posição de destaque mundial, como destino adequado para diferentes fontes de resíduos agrícolas e industriais, minimizando a emissão de gases de efeito estufa, em especial o CO<sub>2</sub>.

Usón *et al.* (2013) abordaram em seu trabalho, o potencial da indústria do cimento em reduzir a dependência de combustíveis fósseis e recursos naturais (calcário e argila), e analisaram quais são os resíduos mais comuns: resíduos sólidos urbanos, farinhas animais de carne e ossos, lodo de esgoto, biomassa e pneus em fim de vida.

Aprianti *et al.* (2015) destacaram em seus estudos que, após o processo de queima, as cinzas geradas poderiam ser utilizadas como material suplementar, devido às suas propriedades químicas e físicas, que estão apresentadas na Tabela 4. Além disso, acentuaram a importância

da destinação adequada dos resíduos agrícolas com por exemplo cinzas provenientes do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do cimento após o processo de cogeração de energia.

**Tabela 4: Propriedades químicas e físicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.**

Elementos	Composição (% em massa)
SiO <sub>2</sub>	60,0 – 65,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7 – 9,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1 – 5,5
MgO	1,1 – 2,9
CaO	4,0 – 10,5
Na <sub>2</sub> O	0,3 – 0,9
K <sub>2</sub> O	1,4 – 2,0
SO <sub>3</sub>	0,1 – 0,2
Propriedades físicas	
Distribuição de tamanho de partícula, (µm)	66,9 – 107,9
Massa específica	1,9 – 2,4
Área de superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	274,0 – 943,0
Perda ao fogo (% em massa)	15,3 – 19,6

Fonte: Retirado de Aprianti *et al.* (2015)

Para Ludwig e Zhang (2015), esses resíduos deveriam ser constituídos basicamente de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, desta forma, em teoria, seriam potencialmente utilizados como matérias-primas de fontes alternativas. É importante evidenciar que, mesmo apresentando composição química que qualificaria os materiais escória, fíler e pozolana como matérias-primas de fontes alternativas para produção de clínquer, estes materiais não foram tratados dessa forma, visto que foram abordados como adições normalizadas do cimento Portland.

Um das matérias-primas que ganhou destaque na produção de cimento foi o pneu, Machin, Pedroso e Carvalho (2017) registraram que a geração de resíduos de pneus no Brasil foi de aproximadamente 473 mil toneladas em 2015. Eles estimaram ainda que a geração anual estaria entre 17 e 20 milhões de unidades, sendo 6 milhões apenas no estado de São Paulo.

Pipilikaki *et al.* (2005) destacaram que pneus destinados aos fornos de cimento podiam ser processados ou utilizados inteiros. Quando utilizado inteiro, seus constituintes eram coprocessados como matérias-primas alternativas (aço), e a adição de minério de ferro poderia ser reduzida. Outro ponto constatado pelos autores foi que, em média, pneus apresentavam 15% menos enxofre do que o carvão de baixo enxofre utilizado na fabricação de cimento.

Outra forma de destinação de resíduos que merece destaque é a utilização de terra contaminada por combustível ou óleo, que pode ser empregada para substituir parte da argila utilizada no processo de formação da farinha crua.

Em seus estudos, Luo *et al.* (2016) destacaram a preocupação em destinar adequadamente os sólidos gerados no beneficiamento do minério de ferro, e a possibilidade de substituir a argila como fonte material corretivo. A composição química das matérias-primas estudadas pelos autores é mostrada na Tabela 5.

**Tabela 5: Composição química das matérias-primas (% em massa).**

Materiais	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
IOT	1,22	45,41	19,07	10,86	12,41	7,23	0,44
Argila	4,34	65,44	17,27	5,53	0,98	1,59	0,10
Calcário	42,97	0,49	0,16	0,05	55,78	0,35	0,12
Areia de quartzo	0,21	97,83	0,52	0,20	0,27	0,10	-
Minério de ferro	10,23	32,69	8,05	33,60	1,92	2,84	3,50
Rejeitos de minério de ferro (IOT); Perda ao fogo (PF)							

Fonte: Luo *et al.* (2016)

Nas suas pesquisas na Europa, Schoon *et al.* (2012) empregaram resíduos de fibrocimento como matéria-prima alternativa ao calcário para fornos de clínquer Portland, concluindo que se trata de uma alternativa viável. Esses estudos, quando adaptados às condições regionais, têm o potencial de contribuir ainda mais para a destinação adequada dos resíduos provenientes das fábricas de fibrocimento no Brasil.

## 2.6 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA INDUSTRIA DO CIMENTO

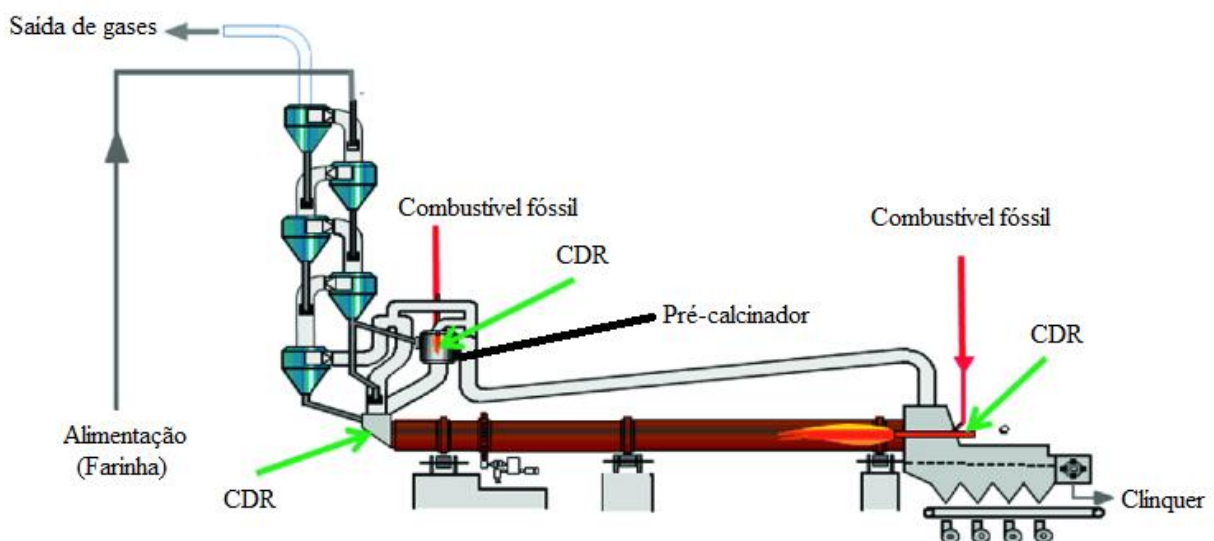
Segundo Madlool *et al.* (2011), os fornos de cimento, conhecidos como fornos de clínquerização, utilizam diferentes fontes de energia, sendo as mais comuns: carvão, óleo combustível, coque de petróleo, gás natural e diesel. Usón *et al.* (2013) destacaram a viabilidade de substituir combustíveis fósseis e gerenciar resíduos com potencial energético, os quais normalmente eram subprodutos de outras indústrias.

Estes subprodutos, minimamente caracterizados, são introduzidos no processo através de até 6 pontos de alimentação, a depender da configuração de cada fábrica (Horsley; Emmert; Sakulich, 2016).

1. O queimador principal na extremidade de saída do forno.
2. Válvulas de forno médio ou rampas de alimentação (somente em fornos longos).
3. Uma rampa de alimentação na extremidade de entrada do forno rotativo.
4. Queimadores secundários no duto de riser, localizado entre a entrada do forno rotativo e o pré-calcinador ou sistema de pré-aquecedor.
5. Queimadores de pré-calцинаção.
6. Rampas de alimentação dentro dos sistemas de pré-calcinador ou pré-aquecedor.

A Figura 4 ilustra um típico processo de coprocessamento de combustível em fornos de clínquer, sendo também, a abordagem adotada para a injeção de combustível alvo desta pesquisa.

**Figura 4: Sistema Pré-Aquecedor, Pré-Calcinador e Forno Rotativo de Clínquer**



Fonte: adaptado de Ghosh, Parlikar e Karstensen (2022) / Nota: CDR – Combustível derivado de resíduo.

Brasil (2020), em seu Art. 4º, estabelece que os combustíveis obtidos de resíduos, com potencial para substituir os combustíveis fósseis, são denominados combustíveis alternativos.

De acordo com Serrano, Reyes e Chowaniec (2017), a utilização de combustíveis alternativos nos fornos de cimento além de preservar as fontes não renováveis de combustíveis fósseis e ajudar a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, também representa uma opção segura para a gestão de resíduos, evitando seu descarte em aterros ou incineradores.

Múltiplos fatores são responsáveis pelo sucesso da técnica de coprocessamento em fornos de cimento. Luo *et al.* (2015) destacaram que a produção de cimento é uma das mais intensivas em energia do mundo, o que unicamente serviria para impulsionar a busca por materiais substitutos aos combustíveis fósseis. Além dos incentivos econômicos associados à técnica, existe também a necessidade de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> do setor, que contribui isoladamente com aproximadamente 5% a 7% das emissões globais (Mikulčić *et al.*, 2016; Wi *et al.*, 2018).

Para Maddalena, Roberts e Hamilton (2018), o cimento Portland destaca-se como um dos materiais mais produzidos globalmente. A indústria do cimento precisará superar desafios como escassez de combustíveis fósseis e matéria-prima, aliado a crescentes preocupações ambientais (Imbabi; Carrigan; Mckenna, 2012).

O uso intensivo de energia aliado a escassez de combustíveis evidenciou a técnica de coprocessamento, que segundo Usón *et al.* (2013), foi essencial para promover diferentes métodos que mitigassem impactos ambientais pela redução do consumo de energia e materiais não renováveis. Pipilikaki *et al.* (2005), chamaram atenção para destinação de pneus em fim de vida, que são coprocessados como matéria-prima e combustível alternativo, a Tabela 6 resume a análise de alguns combustíveis comumente utilizados em fornos de clínquer, evidenciando a segurança da adoção de pneus como combustível secundário, evidenciado pela similaridade nos valores dos parâmetros entre os combustíveis convencionais e o derivado de pneus, que reforça a eficácia deste último.

**Tabela 6: Análise comparativa de combustíveis**

Análise	Coque de Petróleo	Carvão Mineral	TDF
Volátil (%)	13	36,8	72
Cinzas (%)	7,1	14	7
Carbono (%)	82,6	80,6	84
Hidrogênio (%)	3,4	4,6	5
Enxofre (%)	4,9	0,7	2
Nitrogênio (%)	1,75	0,3	1,75
PCI (kJ/kg)	32.480	27.430	31.400

Fonte: Pipilikaki *et al.* (2005)

Quando destinado à substituição térmica, os combustíveis alternativos são comparados aos combustíveis convencionais empregados na indústria do cimento, como, por exemplo: gás

natural, coque de petróleo, carvão mineral, óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, GLP e lenha (Moraes dos Santos; Massanares; Santos, 2019).

Horsley, Emmert e Sakulich (2016), destacaram que o carvão é responsável por grande parte da energia consumida nas unidades produtivas de cimento ao redor do mundo, ficando com 67% da demanda. O coque assume 14% do consumo energético, ficando todo o restante representado por resíduos, sendo a maior parte fornecida por resíduos líquidos com 8% da energia, resíduos sólidos diversos com 4%, pneus com 3%, gás natural com 3% e óleo combustível representado por frações da totalidade.

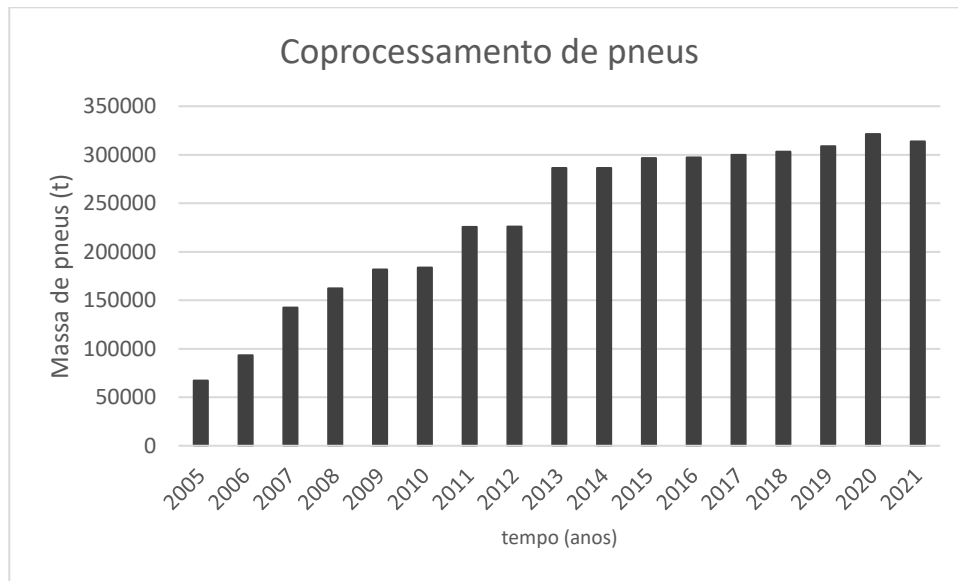
Estudos conduzidos por Usón *et al.* (2013) indicam que, independentemente da matriz energética ou do teor de substituição, existem oportunidades para avançar na gestão de recursos alternativos. A Tabela 7 mostra a variação entre 2010 e 2011 para alguns países europeus.

**Tabela 7: Relação de substituição de combustíveis fósseis por materiais residuais em países europeus selecionados.**

País	Relação de substituição
Itália	8,6%
Espanha	22,4%
Dinamarca	25,0%
França	29,4%
Suécia	29,0%
Noruega	60,0%
Áustria	63,1%
Suíça	49,0%
Bélgica	47,3%
Alemanha	62,0%
Países Baixos	83,0%
Reino Unido	39,5%
Média EU-27 (2010)	30,5%

Fonte: retirado de Usón *et al.* (2013).

Em seu relatório intitulado, panorama do coprocessamento 2022, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), divulgou que o índice de substituição térmica da indústria do cimento foi de 26%, e destas substituições, o pneu merece destaque, ocupando 45,48% da utilização, a Figura 5 traz o aumento deste consumo nos últimos anos.

**Figura 5: Evolução do coprocessamento de pneus**

Fonte: Relatório ABCP (Panorama do Coprocessamento 2022)

Corroborando com as informações industriais do relatório da ABCP, Machin, Pedroso e Carvalho (2017), alertaram que compostos gerados pela queima de resíduos de pneus em fornos rotativos (ou fornos de clínquer), não alteram a qualidade do cimento, evidenciado pela longa utilização e qualidade do produto. Outra constatação importante dos autores, foi a versatilidade do uso com diferentes tamanhos, mostrado pela figura 6, e a reduzida taxa de emissões de gases NO<sub>x</sub>, se comparado ao carvão, podendo alcançar índices 4 vezes menores.

**Figura 6: Alimentação de pneu no processo**

Fonte: página 87 do Relatório integrado 2020 da Votorantim cimentos

## 2.7 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS (CDR)

Em seus estudos, Zhang *et al.* (2021), registraram preocupação com a complexidade dos problemas relacionados a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e estimam geração de 2,2 bilhões de toneladas em 2025, baseados em publicações do Banco Mundial.

Para Rahman *et al.* (2015), a elevada disponibilidade do RSU o torna atraente para substituir até 30% do combustível tradicional, desde que previamente caracterizado, passando a se chamar combustível derivado de resíduos (CDR), sua composição típica é apresentada no Tabela 8. As operações de caracterização identificadas pelos autores abrangeram uma série de etapas, tais como separação na fonte, classificação ou separação mecânica, redução de tamanho (trituração, lascamento e fresagem), separação e triagem, mistura, secagem e peletização, além de embalagem e armazenamento.

Normalmente estas ações são realizadas nas proximidades das fábricas de cimento por cooperativas de reciclagem ou empresas denominadas blendeiras, que além de contribuir ecologicamente com a gestão dos resíduos municipais, contribuem de forma social, gerando emprego para população local.

Chatziaras, Psomopoulos e Themelis (2016), dentre as constatações, a remoção de recicláveis, inertes e frações úmidas, geram um material entre 20% a 50% do original (em massa), que nestas condições, podem ser incinerados diretamente ou peletizado. Os autores ainda relataram que CDR com umidade menor que 15%, geram redução líquida de 0,4 toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de carvão.

Frente aos benefícios apontados pelos pesquisadores que dedicaram seus estudos ao CDR, como fonte alternativa de energia em fornos de cimento, resta a preocupação com as restrições aos compostos por enxofre e cloro, sendo o cloro nesta etapa, mais prejudicial ao processo (Usón *et al.*, 2013; Rahman *et al.*, 2015; Chatziaras; Psomopoulos; Themelis, 2016).

Essa possível interferências na unidade produtiva são decorrentes de incrustações nos equipamentos. Para minimizar esse efeito, é aconselhável manter o teor de cloro abaixo de 0,2% e o de enxofre abaixo de 2,5%. (Horsley; Emmert; Sakulich, 2016; Rahman *et al.*, 2015; Madlool *et al.*, 2011).

**Tabela 8: Composição química e poder calorífico do RSU e CDR**

Componente	% Sólidos secos RSU	% Sólidos secos CDR
Carbono	34,88	47,10
Hidrogênio	4,65	7,10
Nitrogênio	1,02	0,70
Enxofre	0,15	0,24
Cloro	1,02	0,60
Oxigênio	23,11	29,40
Umidade	31,20	15,00
Matéria volátil (MV)	64,83	82,06
Cinzas	35,17	10,90
Valor Energético	15,4 MJ / kg	21,2 MJ / kg

Fonte: retirado de Rahman *et al.* (2015).

Apesar da caracterização preliminar recebida, por se tratar de resíduo, que normalmente é obtido de diversas fontes, frequentemente excedem determinados teores, representando um desafio. Diante disso, uma saída encontrada pelos fabricantes de cimento, é misturar a “carga” de CDR com outra fonte de combustível alternativo que apresente teores mais baixos de cloro e/ou enxofre.

Outra saída para minimizar os impactos gerados pelos cloretos é a aplicação de um sistema de bypass do forno, uma abordagem reconhecida por interromper a recirculação interna do elemento cloro. Este método consiste em direcionar gases de combustão do forno para um sistema de controle de poluição do ar. (Tsiliyannis, 2016; Wang *et al.*, 2023).

## 2.8 FARINHAS ANIMAIS DE CARNE E OSSOS (FCO)

Presente no panorama do coprocessamento da ABCP e no estudo realizado por Bourtsalas *et al.* (2018), ossos de animais são fontes viáveis de combustíveis alternativos, Lima Silva (2016), buscou compreender a viabilidade ambiental, comercial e técnica para coprocessar o que chamou de farinha de carne e ossos (FCO), o autor concluiu que a destinação de subprodutos de origem animal é viável nas condições do seu trabalho.

Para Rahman *et al.* (2015), o uso consolidado de FCO na União Europeia como combustível alternativo estava ligado ao incidente conhecido como doença da vaca louca, que proibiu o uso de FCO como ração para bovinos. Wzorek (2012), corroborou essa observação, complementando seus estudos com o registro do poder calorífico e das propriedades desses materiais, disponíveis para consulta na Tabela 9.

**Tabela 9: Propriedades das farinhas de origem animal**

Parâmetro	Unidades	Farinha de osso	Farinha de carne	Farinha de sangue
LHV	MJ/kg	13,8 - 14,1	17,3 - 25,0	21,9 - 23,4
Água	%	3,3 - 4,9	0,5 - 7,0	3,9 - 4,0
Cinzas	%	34,5 - 41,4	10,9 - 20,5	1,4 - 1,6
Análise final% em peso de matéria seca				
C	%	30,5 - 33,3	40,5 - 43,8	51,8 - 52,0
N	%	3,5 - 51,8	7,7 - 43,8	15,60
H	%	7,3 - 7,9	4,1 - 5,3	6,50
O	%	0,1 - 0,3	13,9 - 20,0	-
S	%	4,4 - 4,7	0,3 - 0,5	1
LHV - Low Heat Value (*Poder calorífico inferior)				

Fonte: Wzorek (2012).

Wzorek (2012) sugere ainda a utilização do FCO em combinação com o lodo municipal, pode agregar vantagens energéticas ao combustível produzido com a mistura.

## 2.9 LODO MUNICIPAL OU LODO DE ESGOTO

Para Rodríguez *et al.* (2013), a destinação adequada do lodo é cara e ambientalmente sensível, mas seu uso como combustível e matéria-prima alternativa, fornece um método de descarte seguro. De maneira abrangente, sua pesquisa destacou a vantagem da utilização de lodo seco na produção de cimento, evidenciando uma redução de até 66% no consumo de combustível fóssil e de até 14% de argila.

Apesar de sua elevada umidade, o lodo é seco com calor residual do forno antes de sua introdução ao processo, e partes não combustíveis são utilizadas como matéria-prima (Chatziaras, Psomopoulos e Themelis, 2016), sendo a utilização térmica do lodo de esgoto só é possível em baixa umidade (Wzorek, 2012).

Os estudos de Liu *et al.* (2015), avaliaram o desempenho do lodo como fonte de combustível ou matéria-prima alternativa, o poder calorífico registrado ficou entre 13.800 - 14.650 kJ / kg de matéria seca. Os principais componentes identificados são SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, semelhantes aos componentes da argila, um dos insumos utilizados na produção de cimento. (Cheeseman; Sollars; Mcentee, 2003; Liu *et al.*, 2015).

Outros autores perceberam a mesma semelhança, Liu *et al.* (2018), registrou a composição do seu material como descrito na Tabela 10.

**Tabela 10: Principais propriedades da Farinha Crua e Lodo de Esgoto.**

Amostras	Composição Química (%)									
	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Farinha Crua	28,78	14,30	2,68	2,48	47,60	2,72	N.D	0,30	N.D	0,54
Lodo de Esgoto Municipal	38,93	6,80	3,10	8,60	30,50	1,20	3,30	4,30	0,17	0,49

Fonte: Liu *et al.* (2018) / LOI: Loss on ignition at 1,000°C.

## 2.10 BIOMASSA

Nakashima *et al.* (2017), definiram biomassa como um material orgânico não fóssil de origem biológica, Pires *et al.* (2018) julgaram ser de fontes renováveis, oriundo de plantios, resíduos agrícolas, podas ou serrarias. Conceito alinhado com a definição apresentada por Demirbaş (2003), que entendia que combustíveis de biomassa, eram potencialmente de fontes renováveis e eram fortes substitutos orgânicos do petróleo.

No Brasil, a biomassa está disposta da seguinte forma: origem agrícola e florestal, englobando todos seus produtos e resíduos, bem como rejeitos urbanos e industriais (Santos; Do Nascimento; Alves, 2017). Além disso, Hansted *et al.* (2018), relatam que diferentes setores podem fornecer biomassa, e existe uma alta disponibilidade no país. Apesar de disponível em grande parte do território nacional, Scalet *et al.* (2018) relatam que este recurso energético proveniente de fontes orgânicas, representou apenas 8,2% da produção de energia elétrica no Brasil em 2017, entretanto, ainda existe potencial para crescer, segundo Sette Jr *et al.* (2018), o Brasil tem potencial para aumentar a participação da biomassa na matriz energética, entre outros fatores, devido à grande quantidade de resíduos gerados nos setores agrícola e florestal, tanto no campo quanto na indústria.

Para Benhelal *et al.* (2013), apesar de não ser uma abordagem nova, a estratégia de utilização de combustíveis alternativos ainda é considerada uma solução promissora, porque além de gerar menor quantidade de poluentes ligados a combustão, reduz indiretamente as emissões de outras etapas do processo, e normalmente estes combustíveis incluem:

- Resíduos de biomassa agrícola;
- Resíduos de biomassa não agrícola;
- Resíduos de base de petróleo;
- Resíduos diversos;
- Resíduos químicos e perigosos.

Molin Filho (2020), demonstrou a aplicação da casca de eucalipto em até 7% de substituição térmica em fornos de clínquer, Lopes, Brito e Moura (2016), citaram o uso de cavacos de madeira provenientes de usinas de reciclagem como fonte energética, os quais são derivados de resíduos de madeira oriundos de aterros municipais ou da construção civil.

Quispe, Navia e Kahhat (2019) destacaram que os resíduos agrícolas têm sido amplamente estudados como uma fonte de energia alternativa. Segundo Maryoto e Sudibyo (2018), a casca de arroz tem sido empregada como um resíduo de biomassa para servir como combustível alternativo na indústria de cimento. Essa alternativa pode substituir o carvão mineral em uma proporção de 2 partes de casca para 1 parte de carvão. Essa contribuição foi confirmada por Jittin, Bahurudeen e Ajinkya (2020), os quais ressaltaram que o componente predominante na cinza de casca de arroz é a sílica amorfa.

Moraes *et al.* (2017), enxergaram na palha da cana-de-açúcar uma biomassa interessante, que é produzida em larga escala e vem aumentando nos últimos anos pela alta demanda na produção de etanol, os autores, ressaltaram ainda o poder calorífico atraente, e que após combustão, a cinza gerada é rica em sílica, o que em tese, tornaria o material completamente absorvido na produção de cimento.

Fernandes *et al.* (2020) afirmaram que 14% de toda produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), é palha, e estimou para safra de 2019/2020, uma geração de quase 90 milhões de toneladas de palha em todo o país, e o estado de São Paulo contribuiria com aproximadamente 53% dessa geração. Para Nakashima *et al.* (2017), é sabido que a grande disponibilidade de palha da cana é um problema para os produtores brasileiros de cana-de-açúcar.

Mesmo contando com uma enorme oferta de material para fins energéticos, a utilização da palha da cana-de-açúcar da maneira que disponível após colheita mecanizada, *in natura*, se mostrou limitante, visto que, sua densidade é relativamente baixa e na maioria dos casos, e o teor de umidade é elevado (Scalet *et al.*, 2018; Sette Jr *et al.*, 2018).

Uma das conclusões de Leal *et al.* (2013) sobre a contribuição da palha na energia total da cana-de-açúcar, foi sua característica semelhante ao bagaço (Tabela 11). Outra constatação importante foi o teor de cloro presente nas folhas secas (0,1%), que representava ¼ do teor das folhas verdes, característica que torna o material atrativo para aplicação em fornos de cimento. Lemos *et al.* (2014), a palha é seca naturalmente no campo após a colheita da cana-de-açúcar e, após 5 dias, a palha no campo já está seca.

**Tabela 11: Análise da palha e do bagaço da cana-de-açúcar em fração de massa seca de material**

Determinação	Folhas secas	Folhas verdes	Topo	Bagaço
Teor de umidade	13,5	67,7	82,3	50,2
Carbono fixo	11,6	15,7	16,4	18,0
Matéria volátil	84,5	80,6	79,3	79,9
HHV (MJ kg <sup>-1</sup> )	17,4	17,4	16,4	18,1
Análise final% em peso de matéria seca				
Elemento	Folhas secas	Folhas verdes	Topo	Bagaço
Carbono	46,2	45,7	43,9	44,6
Hidrogênio	6,2	6,2	6,1	5,8
Nitrogênio	0,5	1,0	0,8	0,6
Oxigênio	43,0	42,8	44,0	44,5
Enxofre	0,1	0,4	0,1	0,1
Cloro	0,1	0,4	0,7	0,002

HHV - Higher Heating Value (\*Poder calorífico superior)

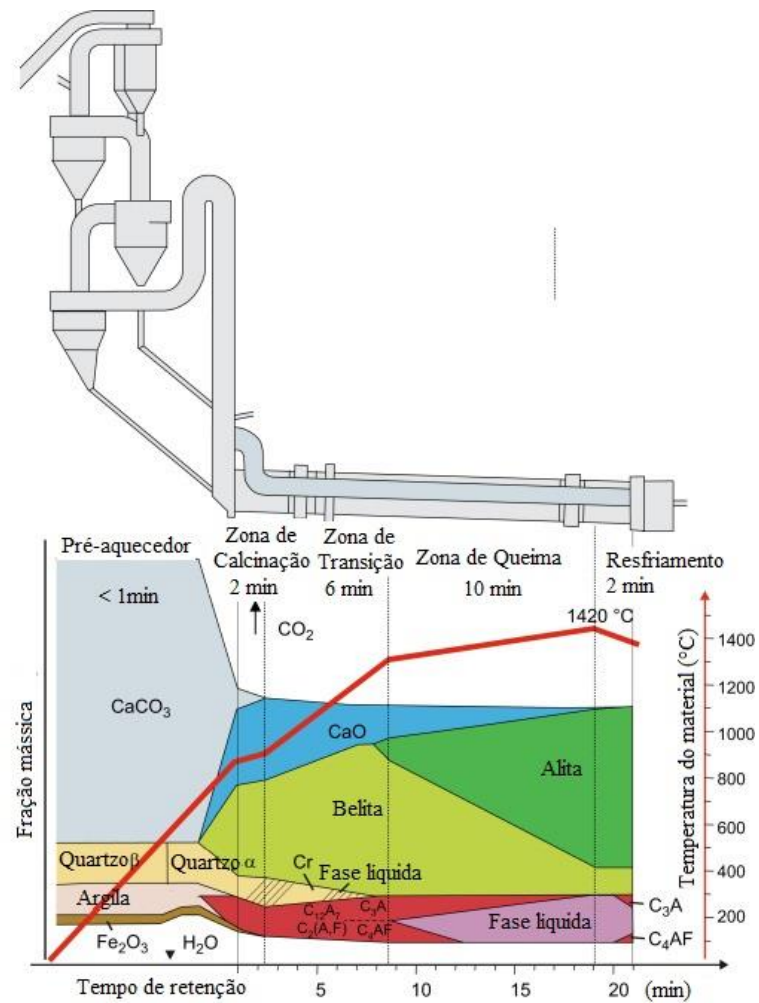
Fonte: Leal *et al.* (2013)

Para contornar os desafios associados ao emprego da palha da cana-de-açúcar *in natura*, uma alternativa encontrada consiste na compactação em pellets ou briquetes. Essa abordagem visa diminuir de maneira controlada os níveis de umidade, proporcionando, maior densidade ao material (Aló *et al.*, 2017; D. Padilla *et al.*, 2016; Sette Jr. *et al.*, 2018; Smith *et al.*, 2019; T. Nakashima *et al.*, 2017). Operação que tornaria melhor as condições logísticas deste material, podendo alcançar valores médios de 0,9025g/cm<sup>3</sup>, mas não mudaria o poder calorífico da biomassa após o processo de briquetagem (Fernandes *et al.*, 2020).

Dentre as muitas possibilidades de coprocessamento de resíduos em fornos de cimento para geração de energia, a compactação em pellets ou briquetagem se destaca como uma promissora técnica. Essa abordagem é favorecida pela disponibilidade da palha de cana-de-açúcar em todo o território nacional, especialmente no Estado de São Paulo, que responde por mais da metade dessa produção (Dias, 2021).

A produção de cimento por via seca, principal tecnologia para produção de cimento no Brasil, abrange diversas etapas, desde a extração em uma mina calcária, a pré-homogeneização, a moagem da farinha crua, as reações de clinquerização no forno, até a moagem e a distribuição do produto final (Visedo; Pecchio; Oliveira, 2019). Para um melhor entendimento do impacto que a substituição parcial do combustível na fabricação do cimento Portland pode acarretar, a Figura 7 fornece detalhes sobre a formação dos compostos do clínquer nas principais zonas do forno.

**Figura 7: Formação dos compostos do clínquer num forno de cimento**



Fonte: adaptado de Glasser (2003).

Essa revisão bibliográfica evidenciou que em diversos estudos, seja com resíduo agrícola, urbano ou industrial, o resíduo pode ser utilizado como fonte parcial de energia térmica, em alguns casos, podendo até substituir parte da matéria-prima utilizada para produção de clínquer. E foram essas considerações que reforçaram a ideia para diversificar a matriz energética na produção de cimento, especialmente após considerar o trabalho realizado com cascas de eucalipto, que também destacou a viabilidade prática associada à utilização deste resíduo como fonte de energia em escala industrial.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado foi fornecido por uma empresa do setor sucroalcooleiro, situada a cerca de 90 km da fábrica onde os experimentos e as análises industriais foram conduzidos.

Na etapa de incorporação da biomassa no processo produtivo, optou-se por alimentá-la principalmente através do pré-calcinador, posicionado abaixo do pré-aquecedor e acima do forno (Figura 4). Antes de introduzir a biomassa no sistema produtivo, foi realizada previamente uma caracterização, na qual efetuaram-se análises térmicas, análise imediata e a determinação do poder calorífico da amostra utilizada.

Foi incorporado ao processo produtivo 17% de BCA em substituição do combustível referência, aproximadamente de 98 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar como substituindo ao coque de petróleo.

Foram realizadas duas amostragens em momentos diferentes da produção de cimento. A amostragem T0, referente à produção de cimento utilizando combustível de referência e a amostragem T1 referiu-se a produção de cimento utilizando bagaço de cana-de-açúcar como parte do combustível. Com base nessas amostras, foram realizadas todas as caracterizações deste estudo.

#### 3.1 UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A preparação das amostras para análise seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 10007 (2004), que orienta a retirada de amostras de, no mínimo, três seções distintas do monte ou pilha de resíduos, abrangendo suas porções superior, central e inferior (Figura 8).

Em cada uma dessas seções, quatro alíquotas foram coletadas de forma equidistante, garantindo uma representatividade do material analisado, contribuindo para a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos na análise.

**Figura 8: Amostragem para caracterização do bagaço de cana-de-açúcar diretamente do monte**



A determinação da umidade foi conduzida através da secagem do material em uma estufa de bancada modelo 515, fabricada pela FANEM (Figura 9). A temperatura foi de  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , até atingir um peso constante, conforme prescrito pela norma ABNT NBR 16550 (2018). O cálculo da umidade foi efetuado utilizando a Equação 6.

$$U = \frac{mi - mf}{mi} \times 100$$

Equação 6

U = Umidade (%)

mi = massa inicial (g)

mf = massa final (g)

**Figura 9: Estufa de bancada projetada para operações de secagem e esterilização, com faixa de temperatura ajustável de 50°C a 250°C.**



Fonte: FANEM

### 3.2 DENSIDADE A GRANEL DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O cálculo de densidade a granel foi realizado conforme determinada a ISO 17828. Foi utilizado um recipiente metálico de formato cilíndrico com volume conhecido (5L = 0,005 m<sup>3</sup>). Para registro da massa foi utilizado uma balança eletrônica Toledo 2098/38 com precisão de 10 g e capacidade máxima de 60 kg.

O cálculo para determinação da densidade a granel foi realizado de acordo Equação 7.

$$\rho g = \frac{m2 - m1}{v}$$

Equação 7

$\rho g$  = Densidade a granel (kg.m<sup>-3</sup>)

m1 = massa do recipiente vazio (kg)

m2 = massa do recipiente cheio (kg)

v = volume do recipiente (m<sup>3</sup>)

A alimentação do material no processo foi realizada com auxílio de uma pá carregadeira, a Figura 10 oferece uma descrição visual do emprego do material no pré-calcinador da fábrica.

**Figura 10: Fluxo ilustrativo da alimentação de biomassa.**



### 3.3 TEOR DE CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma (ABNT NBR 16550, 2018). Foi utilizado um cadinho de porcelana com 1g de bagaço de cana-de-açúcar em base seca. O cadinho foi inserido em uma mufla pelo período de 4 horas à temperatura de  $575 \pm 25^\circ\text{C}$ . Para registro da massa, foi utilizada uma balança analítica eletrônica (figura 11 A) com precisão de 0,10 mg e capacidade máxima de 220g.

**Figura 11: Balança analítica de precisão e forno elétricos tipo Mufla**



O cálculo do teor de cinzas foi realizado de acordo Equação 8.

$$N = 100 \times \frac{MN}{MB} \quad \text{Equação 8}$$

N = Teor de cinzas totais, expresso em porcentagem massa por massa (% m/m);

MN = massa de cinzas, expresso (g);

MB = massa do bagaço de cana-de-açúcar, em base seca, expressa (g);

### 3.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

Para o ensaio do Poder Calorífico Superior (PCS), a amostra foi submetida a um processo de quarteamento e secagem como descrito em 3.1 UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR. Após a completa secagem da amostra, foi selecionada uma quantidade precisa de 0,5g de material como apresentado na Figura 12.

**Figura 12: Preparação da amostra para ensaios em bomba calorimétrica digital**



Os ensaios para determinar o poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar foram realizados em base seca, seguindo especificações da ASTM D5468. Para essa finalidade, empregou-se uma bomba calorimétrica digital Parr modelo 6200 (conforme mostrado na Figura 13).

**Figura 13: Bomba calorimétrica Parr Modelo 6200 controlada por microprocessador**

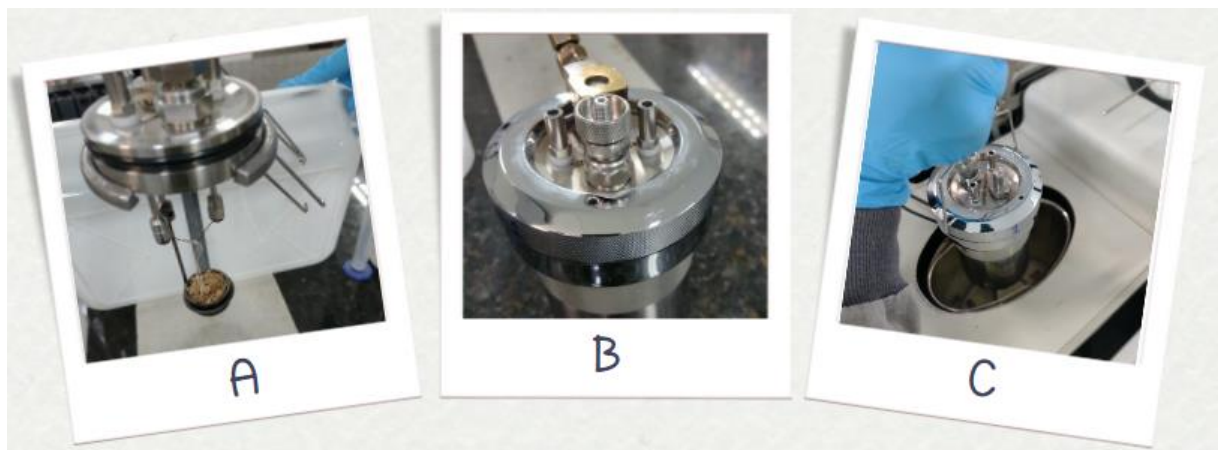


Fonte: Parr

Antes de iniciar os procedimentos do ensaio, o calorímetro Parr modelo 6200 foi ligado, permitindo um período de 30 minutos para estabilização da temperatura da água e ajuste da pressão do gás oxigênio para 30 atm.

O material preparado foi então inserido em um cadinho e colocado dentro do equipamento calorimétrico como apresentado na Figura 14. A combustão completa do material foi realizada, resultando apenas nas cinzas residuais. Durante o processo, o equipamento registrou a diferença de temperatura da água contida no vaso calorimétrico, a partir da qual foi calculado o PCS da amostra.

**Figura 14: Montagem da tampa da bomba calorimétrica digital**



A padronização do calorímetro foi realizada por meio da queima de uma quantidade conhecida de pellets de ácido benzóico padrão ( $C_6H_5COOH$ ). O valor calorífico da amostra de teste é calculado de observações de temperatura realizadas antes, durante e após a combustão, levando em consideração a contribuição de calor de outros processos.

### 3.5 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado seguindo o mesmo modelo utilizado por Aló *et al.*, 2017 e Grotto *et al.*, 2021, assumindo 7% de teor de hidrogênio no bagaço de cana-de-açúcar, a partir da Equação 9, que foi utilizada pelos pesquisadores.

$$PCI = PCS - \left( \frac{600 \times 9H}{100} \right) \quad \text{Equação 9}$$

PCS - poder calorífico superior (kcal/ kg)

PCI - poder calorífico inferior (kcal/ kg)

H - porcentagem obtida na etapa de análise elementar (%).

### 3.6 TEOR DE CLORO

O ensaio de íons cloretos foi conduzido seguindo os parâmetros normativos estabelecidos pela norma (ABNT NBR 14832, 2022). Todo procedimento de preparação de amostra foi administrado da mesma forma que descrito na seção do Poder Calorífico Superior (PCS).

O ensaio teve início com o preparo de uma solução de carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) adicionando 5g desse sal em um béquer. Em seguida, o sal foi dissolvido em água destilada com o auxílio de um bastão de vidro para facilitar a dissolução. Posteriormente, essa solução foi transferida para um balão volumétrico de 250mL usando um funil simples e o volume foi ajustado até chegar à marca indicada no balão. E a solução preparada foi agitada até alcançar completa homogeneização.

Após conclusão da análise da combustão no calorímetro Parr modelo 6200, aguardou-se 15 minutos antes de abrir a bomba, assegurando que o analito fosse devidamente absorvido pela solução.

Para garantir uma resposta eficaz dos íons cloreto formados durante a combustão, foi adicionado 10 ml da solução de carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) preparada ao recipiente da bomba. Essa solução foi empregada para lavar as paredes internas do recipiente antes do início da análise, assegurando uma interação precisa entre os íons cloreto e os íons de sódio, o que

resultou na formação de cloreto de sódio (NaCl) em solução, o qual foi posteriormente analisado pelo método do íon seletivo, utilizando um potenciômetro multiparâmetros Orion Versa Star Pro equipado com eletrodos de íons de cloro.

### 3.7 TEOR DE ENXOFRE

O método empregado para a detecção de enxofre foi norteado pelas normas internacionais ISO 20847 e ASTM D4294. Essas normas preconizam a utilização da técnica de fluorescência de raios X (FRX) para a análise quantitativa de enxofre em combustíveis.

Para confeccionar a pastilha, uma amostra do material foi queimada até produzir 13g de cinzas para análise. Em seguida, adicionou-se 1g de cera micropulverizada às cinzas. Todo o material foi prensado utilizando uma prensa hidráulica Herzog com capacidade para 4 toneladas.

Após a moldagem, qualquer excesso de material da amostra foi removido com a ajuda de um aspirador de pó, antes que a pastilha fosse encaminhada para análise via FRX.

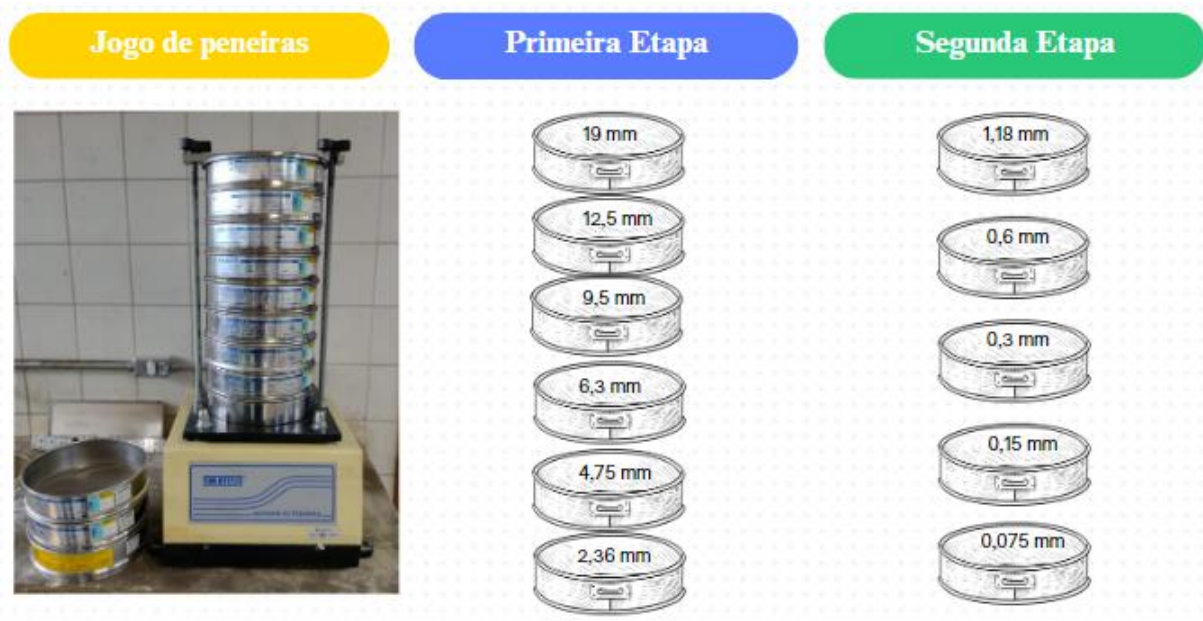
### 3.8 GRANULOMETRIA

Os ensaios foram conduzidos de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 17054 (2022), adaptando-se à baixa densidade do material. Para a condução do ensaio, foram empregados 1000g de material seco, utilizando as peneiras indicadas na Figura 15.

O processo foi executado com o auxílio de um agitador de peneiras, com tempo de ensaio fixado em 5 minutos e ajustado para 10 vibrações.

Devido à capacidade limitada do agitador em relação ao número máximo de peneiras suportadas, o ensaio foi dividido em dois conjuntos, conforme demonstrado na Figura 15.

**Figura 15: Disposição das peneiras utilizadas nas duas etapas de ensaios**



### 3.9 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

As características relacionadas ao estudo térmico do bagaço de cana-de-açúcar foram analisadas em duplicata, utilizando um analisador termogravimétrico Perkin Elmer Pyris 1 TGA. No decorrer do experimento, 1,233 mg de amostra foi avaliada, variando a temperatura da zona de controle entre 30°C e 900 °C. A taxa de aquecimento utilizada foi de 20 °C/min, com um fluxo de ar sintético de 20 mL.min<sup>-1</sup> de gás, conforme mostrado na Figura 17.

**Figura 16: Analisador termogravimétrico Perkin Elmer**



Fonte: retirado do site do fabricante PerkinElmer

### 3.10 ANÁLISE DIFERENCIAL TERMOGRAVIMÉTRICA (DTG)

A análise diferencial termogravimétrica (DTG) foi obtida a partir dos dados gerados pela análise termogravimétrica (TGA). Para esse fim, utilizou-se o software OriginPro 2024 em sua versão de aprendizado, disponibilizada gratuitamente pela empresa Originlab em seu site oficial. A DTG permitiu uma identificação mais precisa dos pontos de maior deflexão nas curvas TG das amostras analisadas, indicando as temperaturas onde ocorriam a maior decomposição do material estudado.

### 3.11 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS

Foram feitas análises físico-químicas e mecânicas no cimento produzido para garantir que durante o período de testes, o material estivesse em conformidade com os padrões técnicos definidos pela fábrica, além de cumprir com todas as normas e legislações vigentes. De maneira geral, o objetivo principal era garantir que o cimento produzido atendesse aos requisitos mínimos necessários, mesmo com a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia, sem comprometer a eficiência da fábrica.

### 3.12 ENSAIOS INDUSTRIAIS

Os ensaios industriais foram conduzidos ao longo de quase 16 horas nas instalações de uma cimenteira. Durante esse período, foram utilizadas cerca de 98 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar e coque de petróleo no pré-calcinador do forno. Esse intervalo de tempo foi considerado adequado para estabilizar o processo, possibilitando a realização de coletas e medições necessárias para essa investigação.

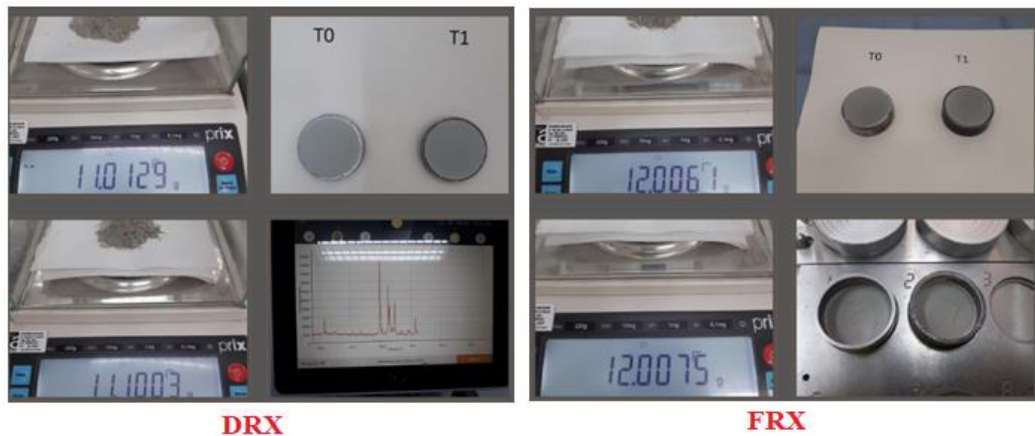
Durante o período de testes, houve monitoramento constante dos indicadores ambientais, os quais já são rotineiramente controlados pela empresa, e qualquer leitura que apresentasse valores fora da faixa típica monitorada, acarretaria numa interrupção do teste. Apesar do monitoramento em tempo integral, é importante ressaltar que os dados relativos a esses indicadores não serão discutidos neste trabalho.

Para a avaliação do cimento produzido durante a condução dos testes, foram realizadas duas amostragens em momentos distintos de produção: T0, correspondente à produção utilizando combustível de referência, e T1, está associada à produção utilizando bagaço de cana-de-açúcar como parte do combustível. Em posse destas amostragens, foram conduzidos os ensaios que caracterizaram todo o material analisado neste estudo, fornecendo orientações sobre possíveis impactos no processo produtivo. A coleta das amostras T0 e T1 seguiu os

procedimentos internos da empresa, estes procedimentos são baseados nas normas vigentes e seguem as sugestões da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

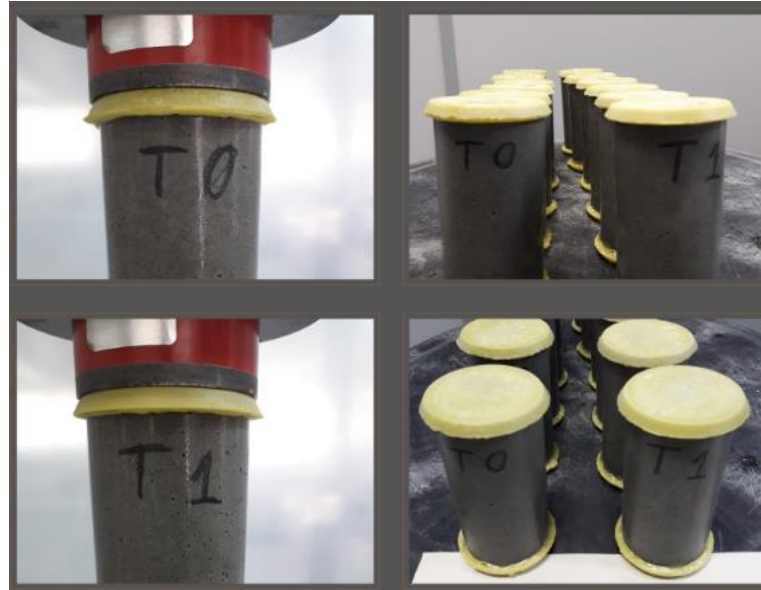
Realizou-se caracterização por meio de Difração de Raios-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X (FRX), comprovando a conformidade com os limites estabelecidos pela norma (ABNT NBR 16697, 2018). Para conduzir o ensaio, as amostras de cimento foram inicialmente convertidas em pastilhas, conforme mostrado na Figura 17, empregando uma prensa hidráulica Herzog com capacidade de 4 toneladas, etapa de ensaio semelhante à descrita no tópico sobre teor de enxofre. Em seguida, essas pastilhas foram submetidas à análise química. Posteriormente, o material foi encaminhado ao laboratório físico para dar continuidade aos testes normativos, considerados requisitos específicos para o cimento do tipo Portland.

**Figura 17: Preparação e análise de pastilha prensada via DRX e FRX**



Os requisitos físicos e mecânicos registrados neste estudo foram conduzidos levando em consideração o tipo e a classe do cimento. Todos os ensaios foram norteados por um conjunto de normas brasileiras específicas (ABNT NBR 7215, 2019; ABNT NBR 11579, 2012; ABNT NBR 11582, 2016; ABNT NBR 16372, 2015; ABNT NBR 16606, 2018; ABNT NBR 16607, 2018). Os corpos de prova utilizados como referência para a resistência à compressão nessa etapa foram evidenciados pela Figura 18. Mesmo procedimento foi adotado para moldar as pastilhas utilizadas no FRX para composição de óxidos presentes nas cinzas do BCA.

**Figura 18: Corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para análise das resistências**



### 3.13 REDUÇÃO DE CUSTOS COM COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DA ADOÇÃO DE BAGAÇO

Nessa etapa o estudo se concentrou apenas na avaliação do potencial de redução de custos usando biomassa, avaliando apenas a diferença de massa alimentada no Pré-Calcinador e os preços de mercado correspondentes, como indicado na Figura 19.

O site Agro2Business forneceu o valor do frete para o transporte do bagaço até a unidade fabril, estimando-o em R\$ 98,00 por tonelada. Para o cálculo do potencial de redução de custos, foi considerado o valor de R\$ 100 por tonelada FOB (Free on Board), uma vez que o material estava localizado no mesmo estado onde foi conduzido o teste industrial.

As premissas adotadas para o cálculo foram as seguintes:

I. Valor da tonelada do coque (FOB): R\$ 1.227,21 – média do último trimestre

Fonte: <https://br.investing.com/commodities/coking-coal-futures>

II. Valor da tonelada do bagaço de cana-de-açúcar (FOB): R\$ 100

**Figura 19: Variação de preços do bagaço de cana-de-açúcar em três Estados produtores**



Fonte: <https://agro2business.com/marketplace?q%5Bsearch%5D=baga%C3%A7o+de+cana>

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

As análises de umidade realizadas estão apresentadas na Tabela 12, demonstrando que o valor médio obtido está em conformidade com os valores apontados por Leal *et al.* (2013). Essa concordância reforça a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos.

**Tabela 12: Análise de umidade do bagaço da cana-de-açúcar em base seca**

Identificação	Teor de Umidade (%)
Amostra 1	49,51
Amostra 2	50,94
Amostra 3	49,26
Valor Médio	49,90
Desvio Padrão:	0,91
Mínimo:	49,26
Máximo:	50,94
Quantidade de análises:	3,00

A umidade foi um parâmetro avaliado, porque estava diretamente ligada ao consumo energético durante o processo de queima. Quanto maior a umidade do bagaço de cana-de-açúcar, menor a quantidade de energia fornecida durante a queima. Correia *et al.* (2020), associaram a umidade com a temperatura de ignição e destacou que a energia necessária para

secagem de 1kg de bagaço com 80% de umidade seria próximo de 14%, obtida pela combustão da própria matéria-prima, no interior do próprio equipamento.

Carvalho (2012), correlacionou o comportamento térmico em diferentes teores de umidade, destacando que para valores acima de 50% a temperatura necessária para ignição deveria estar entre 500 e 600°C. Temperatura que foi superada pelo equipamento utilizado na pesquisa, o qual registou uma temperatura média de 912°C.

Quando comparado aos dados disponíveis na literatura, os resultados de umidade obtidos se mostraram semelhantes, atendendo as condições operacionais do equipamento.

#### 4.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO MATERIAL ANALISADO

Os resultados dos ensaios realizados no material empregado como substituto térmico nesta pesquisa estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

**Tabela 13: Características físico-químicas do BCA**

Ensaio Solicitado	Resultados em duplicatas	
Cloro (%)	0,36	0,18
Enxofre (%)	0,16	0,20
Cinzas (%)	11,87	11,62
PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )	16,93	17,28
Densidade (kg L <sup>-1</sup> )	0,09	0,08

Apesar de a legislação brasileira (CONAMA) limitar a emissão de poluentes oriundos de atividades de coprocessamento de resíduos para a produção de cimento em até 10% de cloro e 11% de enxofre, os valores praticados foram muito menores, garantindo uma aplicação segura do resíduo.

Corroborando com esses valores praticados, Chatterjee (2011), observou que as características da matéria-prima podem influenciar no desempenho do sistema, levando-o a estados de saturação que podem resultar em paradas não programadas do equipamento. O autor ainda evidenciou as condições que poderiam ocasionar depósito de sais nas paredes dos dutos de circulação do equipamento. Neste parâmetro, o BCA demonstrou eficácia, se mantendo dentro da faixa operacional esperada, apresentado valores de cloro e enxofre, inferiores a 0,4%, o que excluiu quaisquer possibilidades de incidentes relacionados a incrustação ou colagem nos dutos do equipamento.

Conforme previsto para um resíduo não perigoso (classificação: Classe II), os principais óxidos identificados na cinza do bagaço de cana-de-açúcar após a queima são compatíveis com os materiais utilizados na produção de cimento (CONAMA), destacado na Tabela 14.

**Tabela 14: Principais óxidos presentes nas cinzas do BCA**

<b>Oxido</b>	<b>Resultado (%)</b>
Na <sub>2</sub> O	0,096
MgO	3,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,753
SiO <sub>2</sub>	29,504
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,474
SO <sub>3</sub>	1,443
K <sub>2</sub> O	16,94
CaO	28,337
TiO <sub>2</sub>	0,418
MnO	0,309
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,854
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,139
NiO	0,069
CuO	0,072
WO <sub>3</sub>	1,385

Embora as cinzas não gerem energia, e para este fim ser um material indesejado pela fábrica, ao utilizar o bagaço de cana-de-açúcar para substituir parte do combustível, promove não apenas a eficiência energética pela substituição de coque de petróleo, mas também se garante a gestão dos resíduos resultantes, neste caso particular, foi gerado até 11,87% de cinzas que foram incorporadas ao produto final. Constatação semelhante a um dos registros de Huang *et al.* (2017), que remete que cinzas com baixo teor de carbono são preferíveis quando usadas nos setores de cimento e concreto.

Apesar de uma geração de cinzas considerada elevada para unidade produtiva, 11,87%, ao relacionar a composição química gerada com o trabalho realizado por Fazil, Kumar e Mahajani (2023), que estudaram a conversão de resíduos de celulose em energia, cuja pesquisa destacou que cinzas formadas com maior proporção de Ca, seguidas de Al, Si, Mg e Fe, podem evitar a aglomeração e a formação de incrustações durante o processo devido às altas temperaturas de fusão das cinzas que ficam entre 1320 e 1420 °C. Informação que ajudou no entendimento relacionado a possíveis incrustações por colagem no equipamento.

A escolha de um material como combustível alternativo passa por caracterizações físico-químicas, que fornecem critérios iniciais para tomada de decisão. O poder calorífico está entre os parâmetros determinantes para utilização de um combustível alternativo, o bagaço de cana-de-açúcar analisado apresentou  $17,28 \text{ MJ kg}^{-1}$ , valor compatível a com a literatura. Kusuma *et al.* (2022) apontou critérios que considerou essenciais para utilização de biomassa como combustível alternativo, dentre as quais a necessidade energética do calcinador deve ser maior que  $8,0 \text{ MJ kg}^{-1}$ , corroborando com o valor encontrado nesta pesquisa.

A densidade foi aferida porque através dela, a unidade produtiva pode fazer o dimensionamento das baias de armazenamento, controlar o fluxo de alimentação para os queimadores e decidir quando se faz necessário misturar o produto com outro resíduo mais denso.

Mesmo apresentando um PSC duas vezes maior que a real necessidade do calcinador, ainda não foi possível a substituição total do combustível típico utilizado pela unidade produtora, para essa ação, seria necessária uma quantidade de material que pode ser dez vezes maior por conta da densidade ( $90 \text{ kg.m}^{-3}$ ) frente a densidade do coque que variou entre  $687$  a  $900 \text{ kg.m}^{-3}$  (Fernandes, 2019; Júnior; Coelho; Santos, 2022; Vega Mejía; Gallardo Brito; Cesin Granado, 2020).

#### 4.3 GRANULOMETRIA

A granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar está apresentada na Tabela 15. Este ensaio correlaciona-se com a densidade aparente do material e seu tempo de residência no equipamento.

**Tabela 15: Granulometria do bagaço de cana-de-açúcar**

Abertura (mm)	massa retida (g)	% Retido	% Acumulado
19	23,39	2%	2%
12,5	90,64	9%	11%
9,5	38,01	4%	15%
6,3	102,34	10%	25%
4,75	236,84	24%	49%
2,36	24,85	2%	52%
1,18	135,97	14%	65%
0,6	166,67	17%	82%
0,3	103,80	10%	92%
0,15	54,09	5%	98%
0,075	19,01	2%	100%
fundo	3,27	0%	100%

A análise granulométrica revelou que a maior parte do material possui dimensões superiores a 0,6 mm, representando aproximadamente 82% do total. A dimensão máxima encontrada foi de 19 mm, enquanto a maioria das partículas apresentou tamanho inferior a 12,5 mm e superior a 1,18 mm. Esses resultados apontam para um material com uma ampla superfície de contato, favorecendo a eficiência no processo de combustão. Isso sugere que o material apresenta um tempo de residência mais curto no equipamento, o que pode contribuir para uma eficiência aprimorada no processo térmico.

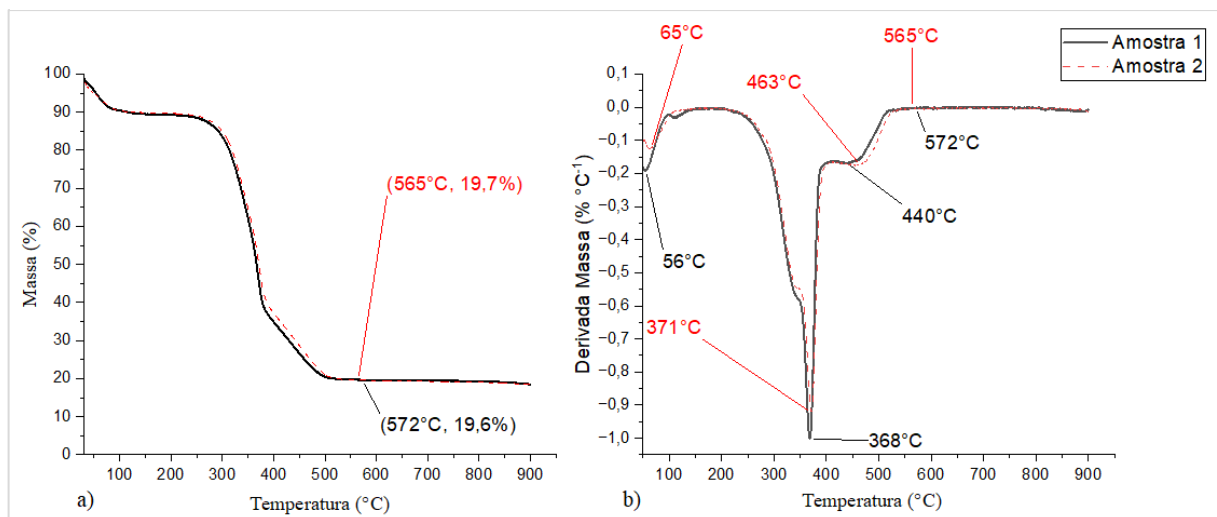
A análise granulométrica, combinada com a densidade do material, fornece elementos sobre aspectos logísticos do bagaço de cana-de-açúcar, como o transporte e armazenamento. Essas informações são fundamentais para estimar a quantidade de caminhões necessários no transporte e determinar as dimensões ideais das baias de armazenamento após o recebimento.

Essa abordagem integrada proporciona uma gestão logística mais eficaz e otimizada para o manuseio do bagaço de cana-de-açúcar ao longo do processo industrial.

#### 4.4 ANÁLISE TÉRMICA

As curvas de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) referentes ao bagaço de cana-de-açúcar (BCA) estão apresentadas na Figura 20.

**Figura 20: Curvas (a) TG e (b) DTG do bagaço de cana-de-açúcar**



O comportamento térmico do bagaço da cana-de-açúcar (BCA) *in natura* está intrinsecamente ligado à composição das suas três principais frações celulose, hemicelulose e lignina, os quais se degradam em diferentes faixas de temperatura (Díez *et al.*, 2020; Nurazzi *et al.*, 2021). Observou-se, essencialmente, três estágios distintos nas curvas TG/DTG, variando conforme o tratamento prévio dado ao material.

Inicialmente, foi observado as primeiras variações de massa associadas à perda de umidade, ocorrendo desde a temperatura ambiente até aproximadamente 65 °C.

O segundo evento detectado ocorre na faixa de temperatura entre 200 °C e 370 °C e está vinculado à degradação térmica da hemicelulose, celulose e, parcialmente da lignina, corroborando observações anteriores documentadas por outros pesquisadores (Marques *et al.*, 2022; Ponte *et al.*, 2019).

Finalmente, a degradação da lignina destaca-se de forma mais expressiva devido à sua estrutura mais complexa, apresentando uma faixa de decomposição mais extensa, que se estende desde os 200 °C até a região do pico máximo da análise (Suárez *et al.*, 2019).

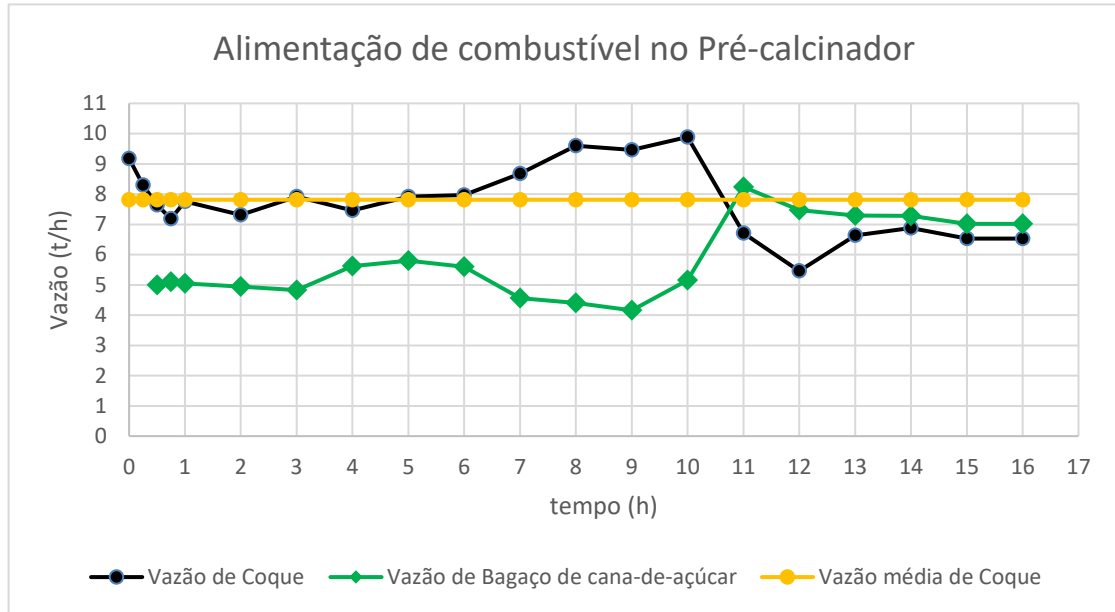
A massa residual ao final do terceiro evento, consiste em duas partes distintas: uma parcela ainda suscetível à combustão e uma porção de cinzas, predominantemente compostas por inorgânicos resultantes das reações de decomposição. Esta fração representou 19,7% do resíduo total, apresentando semelhanças com os dados encontrados na literatura (Gonçalves *et al.*, 2023; Grotto *et al.*, 2021; Mulinari *et al.*, 2009; Nunes *et al.*, 2020; Ponte *et al.*, 2019).

A temperatura de degradação final da amostra ocorreu cerca de 570°C, indicando uma compatibilidade significativa com o combustível empregado em pré-calcinadores. Essa propriedade foi benéfica para promover uma rápida queima do material, uma vez que o pré-calcinador opera em temperaturas em torno de 900°C.

#### 4.5 ENSAIOS INDUSTRIAIS

Durante todo o processo, a alimentação de combustível foi monitorada constantemente, utilizando um total de 98 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, como ilustrado na Figura 21.

**Figura 21: Alimentação do bagaço da cana-de-açúcar no Pré-Calcinador**



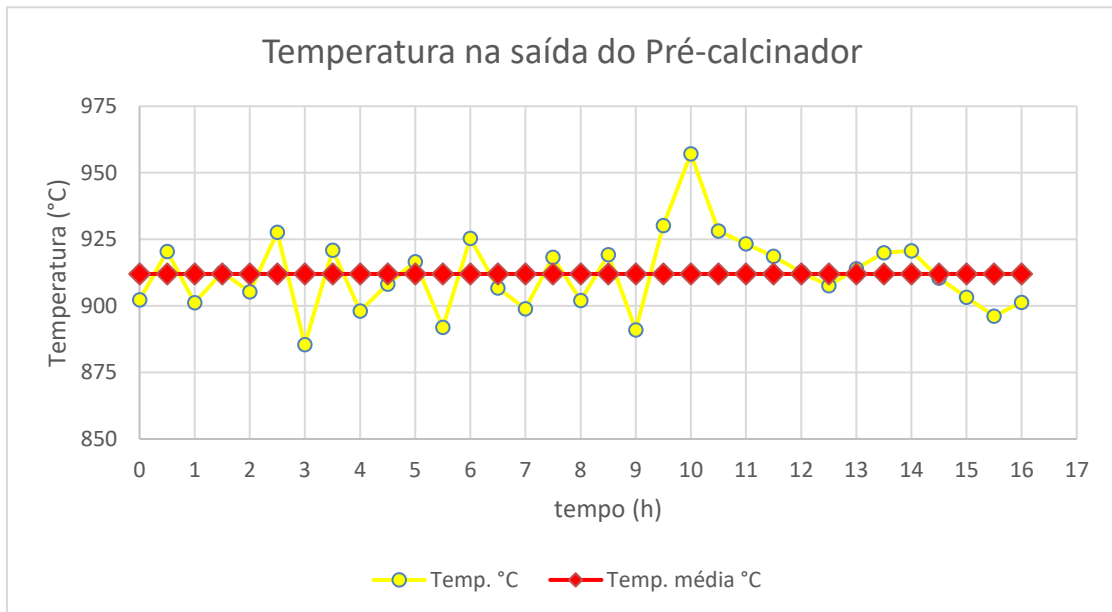
Apenas durante 4 horas do processo, o consumo de coque excedeu a média estabelecida após o início da alimentação do bagaço de cana-de-açúcar. Na décima segunda hora do teste, observou-se que a vazão de coque se aproximou da metade do valor inicial, indicando uma influência significativa da introdução do bagaço de cana-de-açúcar no sistema. Esses dados fornecem *insights* valiosos sobre o comportamento do sistema de alimentação de combustível durante o teste, destacando a influência do bagaço de cana-de-açúcar no consumo de coque.

Apesar do consumo adicional observado entre a sétima e a décima hora do teste, decorrente de um descompasso na alimentação do combustível, que não foi identificado no gráfico que representa a temperatura de saída do pré-calcinador (Figura 22), é importante ressaltar que as curvas de alimentação dos combustíveis se inverteram na etapa final do experimento, logo após a décima hora. Esse cenário contribuiu para um aumento ainda mais significativo da economia gerada pela solução, evidenciando um caso de sucesso na implementação da prática de substituição do combustível para geração de energia térmica. Essa reversão das curvas ressalta a importância do monitoramento contínuo e do ajuste adequado do processo, destacando a eficácia e o potencial de otimização dessa estratégia para redução de custos.

Mesmo considerando a redução de custo gerada pela substituição parcial do coque pelo bagaço, ainda não é viável aumentar o índice dessa substituição. Isso se deve ao elevado volume de bagaço que seria necessário para essa troca, o que poderia demandar uma infraestrutura logística e de armazenamento ainda não mapeada. Além disso, seria necessário implementar controles adicionais para monitorar e regular a temperatura do equipamento durante o processo.

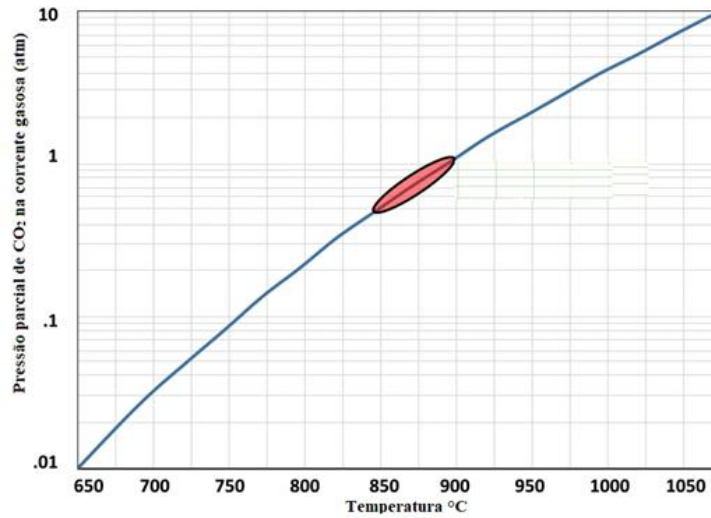
Assim como ocorreu no período de alimentação do sistema com a biomassa, foram realizadas medições de temperatura na saída do pré-calcinador. O objetivo foi monitorar em tempo real a temperatura do sistema durante a substituição do combustível fóssil pela alimentação de bagaço de cana-de-açúcar. Detalhes dessas medições podem ser encontrados na Figura 22.

**Figura 22: Registro da variação de temperatura durante a substituição térmica**



Durante o período analisado, a vazão de alimentação de coque de petróleo foi reduzida de 9,2 toneladas por hora para 7,0 toneladas por hora, enquanto a temperatura média na saída do pré-calcinador permaneceu em torno de 912°C. Essa temperatura, está situada na faixa de operação típica de pré-calcinadores modernos, entre 840 e 900°C, e é capaz de iniciar as reações de calcinação do calcário. Conforme observado por Kline e Kline (2017), essas reações se iniciam em torno de 600 °C e envolvem a decomposição térmica do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) para produzir óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ). A Figura 23 ilustra a relação entre a concentração de  $\text{CO}_2$  na corrente de gás e a temperatura requerida para a calcinação. O destaque em vermelho ressalta a faixa de operação típica mencionada, em conformidade com os registros deste estudo.

**Figura 23: Temperatura de calcinação em função da pressão parcial de CO<sub>2</sub> na corrente gasosa**



Fonte: adaptado de Kline (2017)

Para avaliação de custos diretos do projeto, a substituição de 1,46 toneladas por hora de coque durante as seis primeiras horas do teste, resultou em uma economia de R\$ 10.750,36 no consumo desse combustível. Durante o mesmo período, a inclusão do bagaço de cana-de-açúcar gerou um adicional de R\$ 3.600,00. A diferença desses dados indica uma redução de R\$ 7150,36, demonstrando o potencial dessa abordagem. Esse contexto ressalta a viabilidade da substituição do coque pelo bagaço de cana-de-açúcar, destacando seu potencial tanto em termos financeiros quanto na promoção de práticas sustentáveis.

#### 4.6 ENSAIOS LABORATORIAIS NO CIMENTO PRODUZIDO

A análise química do cimento produzido T0 (combustível referência) e T1 (coprocessamento com bagaço de cana-de-açúcar) estão na Tabela 16.

**Tabela 16: Química dos compostos presentes no cimento produzido durante a pesquisa**

Compostos	FRX	
	CPII F 40 Amostra T0	CPII F 40 Amostra T1
SiO <sub>2</sub>	17,11	17,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,25	4,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,24	2,22
CaO	61,45	61,18
MgO	3,50	3,47
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,38
K <sub>2</sub> O	0,94	0,93
SO <sub>3</sub>	4,15	4,11
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,18	0,18
ZnO	0,03	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,01
SrO	0,18	0,18
PF	4.77	5.12

Enquanto este estudo ocorria, não foi notado e/ou registrado nenhuma variação significativa na temperatura de saída do pré-calcinador, nem mesmo durante a alimentação de farinha crua no sistema, por este motivo, estima-se que as reações de decomposição do carbonato (zona 1), que antecedem o tempo de residência no forno de clínquer, não foram alteradas. Os limites de composição do cimento Portland foram atendidos e mantidos durante o teste, por se tratar de uma pesquisa, as fases apresentadas na Tabela 16 que são consideradas determinações facultativas pela norma vigente, também foram registradas para fins de evidência desta pesquisa.

A resistência à compressão dos testemunhos foi registrada na Tabela 17, onde é feita uma comparação com os valores prescritos pela norma (ABNT NBR 16697, 2018). Além disso, os resultados químicos encontrados foram correlacionados com os valores determinados pela norma e estão registrados na Tabela 18.

**Tabela 17: Requisitos físicos e mecânicos**

Ensaio	Finura (%)		Blaine	Pasta de	Tempo Pega (min)		Expansibilidade	Resistência a Compressão (MPa)			
	#200	#400	(cm <sup>2</sup> /g)	Consistência (%)	IP	FP	a quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
<b>Limites de Norma</b>	≤ 10	N/A	N/A	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15	≥ 25	≥ 40
T0	0,10	0,70	5190	30,80	170	220	--	23,2	36,3	41,8	49,2
T1	0,10	0,56	5310	30,30	175	225	--	24,8	35,8	40,5	49,1

Como o único fator variável da produção deste dia foi o combustível alternativo utilizado em substituição ao coque, a possibilidade de variação química seria uma oscilação na temperatura, o que não foi percebido, por este motivo, não era esperado divergências na formulação do coque produzido, e por consequência o cimento, o que pode ser comprovado no Tabela 18.

**Tabela 18: Requisitos químicos**

Ensaio	PF (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	RI (%)	CO <sub>2</sub> (%)
	ABNT NBR NM 18 (2012)	ABNT NBR 17086-3 (2023)	ABNT NBR 17086-5 (2023)	ABNT NBR 17086-4 (2023)	ABNT NBR 17086-8 (2023)
<b>Limites de Norma</b>	≤ 8,5	N/A	≤ 4,5	≤ 5,0	≤ 7,5
T0	4,77	3,50	4,15	3,67	4,21
T1	5,12	3,47	4,11	2,39	4,51

Dentre os resultados observados na Tabela 18, talvez a perda ao fogo (PF) e o CO<sub>2</sub> poderiam ser considerados os mais críticos, isso porque uma variação indicando um aumento desses parâmetros estaria diretamente relacionada a possível ineficiência na etapa de descarbonização do calcário, entretanto, isso não foi percebido, indicando a eficácia da substituição.

## 5 CONCLUSÃO

O bagaço de cana-de-açúcar pode ser uma alternativa viável para substituir o coque de petróleo em até 17% como combustível utilizado em pré-calcinadores.

A utilização de até 8 toneladas por hora de bagaço de cana de-açúcar em substituição a até 3 toneladas por hora de coque de petróleo no equipamento monitorado se mostrou tecnicamente viável.

Essa substituição não terá um impacto nos cálculos de projeto ou de controle de processos, principalmente pela baixa variação na temperatura de saída do pré-calcinador.

A composição química do bagaço de cana-de-açúcar é semelhante a composição das principais matérias-primas utilizadas na produção de clínquer, sendo ela composta principalmente por: sílica, cálcio, potássio, ferro e alumínio.

Uma vantagem adicional associada à utilização do bagaço como combustível alternativo é que toda a cinza gerada no processo é incorporada ao cimento produzido. Isso elimina completamente a necessidade de gastos com gerenciamento de resíduos.

Os resultados do coprocessamento energético do bagaço de cana-de-açúcar revelam uma série de desafios, como a gestão da umidade, logística e o grau de compactação (densidade), que exigem atenção e aprimoramento para viabilizar uma utilização mais intensiva e eficiente desses recursos. É fundamental que sejam desenvolvidas estratégias e tecnologias adequadas para superar essas limitações e potencializar os benefícios ambientais e econômicos dessa alternativa energética.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-LATIEF, M. A. K. *et al.* A new insight upon the use of weathered basalt as alternative raw material in Portland clinker production. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 885–896, set. 2020.
- AGUIAR, L. V.; FORTES, J. D. N.; MARTINS, E. Neutralização compensatória de carbono - estudo de caso: indústria do setor metal mecânico, Rio de Janeiro (RJ). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 197–205, mar. 2016.
- AITCIN, P.-C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. 1<sup>o</sup>ed ed. Londres: Taylor & Francis e-Library, 2008.
- AJALA, E. O. *et al.* Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 8, n. 1, p. 87, 15 dez. 2021.
- ALÓ, L. L. *et al.* Briquettes of Sugarcane Bagasse and Eucalyptus spp Sawdust: Characterization and Hygroscopic Equilibrium. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 2, p. 774–785, 10 fev. 2017.
- ANDRADE NETO, J. DA S.; DE LA TORRE, A. G.; KIRCHHEIM, A. P. Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. **Construction and Building Materials**, abr. 2021.
- APRIANTI, E. *et al.* Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176–187, jan. 2015.
- ARANDA USÓN, A. *et al.* Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 242–260, jul. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **panorama do coprocessamento 2022**. [s.l: s.n.].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n<sup>o</sup> 200). Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14832**: Cimento Portland e clínquer - Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15213**: Gás natural e outros combustíveis gasosos - Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16550**: Bagaço de cana-de-açúcar - Caracterização química. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland–Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17051**: Materiais pozolânicos: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17052**: Materiais pozolânicos: Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-3**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-4**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-5**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-6**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-8**: Cimento Portland e suas matérias-primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos: análise química: método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4294:** Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5468:** Standard Test Method for Gross Calorific and Ash Value of Waste Materials, 2017.

BENHELAL, E. *et al.* Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142–161, jul. 2013.

BERENGUER, R. *et al.* Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides. **Journal of Building Engineering**, v. 41, p. 14, set. 2021.

BONAVETTI, V. L. *et al.* El modelo de Powers y los límites del contenido de adición de material calcáreo en los cementos portland. **Concreto y cemento. Investigación y desarrollo**, p. 40–50, dez. 2013.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 499, DE 6 DE OUTUBRO DE 2020. **CONAMA Nº 499**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>>. Acesso em: 18 abr. 2021.

BRESSAN, M. CHIARA. **Destinação de resíduos industriais perigosos : as vantagens da destinação por meio de coprocessamento em fornos de clínquer quando comparada com a disposição em aterros industriais**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2006.

CAMPOS, V. A. F. de, SILVA, V. B., CARDOSO, J. S., BRITO, P. S., TUNA, C. E., & SILVEIRA, J. L. (2021, November). A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development. **Renewable Energy**, 802–820. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.107>

CARVALHO, D. M. DE. **Caracterização físico-química e polpação etanol/soda do bagaço e da palha de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 13 fev. 2012.

CORREIA, M. A. C. *et al.* Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 1, p. 173–187, 20 fev. 2020.

CECHIN, L. *et al.* Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. **Matéria (Rio de Janeiro)**, p. 11, 2018.

CHATTERJEE, A. K. Chemistry and engineering of the clinkerization process — Incremental advances and lack of breakthroughs. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 624–641, jul. 2011.

CHATTERJEE, A.; SUI, T. Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. **Cement and Concrete Research**, v. 123, p. 19, set. 2019.

CHATZIARAS, N.; PSOMOPOULOS, C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 27, n. 2, p. 178–193, 14 mar. 2016.

CHEESEMAN, C. R.; SOLLARS, C. J.; MCENTEE, S. Properties, microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 40, n. 1, p. 13–25, dez. 2003.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na construção civil. Em: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. 3ª ed. São Paulo: BRACON, 2017. p. 695–726.

D. PADILLA, E. R. *et al.* Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 22 ago. 2016.

DA SILVA, Rogério Jose. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 1994. 246p.

DE G. FERNANDES, P. H. *et al.* Physico-Mechanical Properties of Briquettes Produced from Heated Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 969–980, 28 ago. 2020.

DE LIMA SILVA, R. **Coprocessamento de mortalidades e subprodutos de origem animal em fábrica de cimento**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Tecnologia Ambiental) - INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS - IFMG, Minas Gerais, 2016.

DEMBOVSKA, L. *et al.* Effect of Pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 202–210, 2017.

DEMIRBAŞ, A. Sustainable cofiring of biomass with coal. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 9, p. 1465–1479, jun. 2003.

DIAS, F. M. F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, v. 36, n. 79, p. 116–142, 3 set. 2021.

DÍEZ, D. *et al.* Determination of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin Content in Different Types of Biomasses by Thermogravimetric Analysis and Pseudocomponent Kinetic Model (TGA-PKM Method). **Processes**, v. 8, n. 9, p. 1048, 27 ago. 2020.

ELGALHUD, A. A.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Carbonation resistance of concrete: limestone addition effect. **Magazine of Concrete Research**, p. 84–106, jan. 2017.

FAZIL, A.; KUMAR, S.; MAHAJANI, S. M. Gasification and Co-gasification of paper-rich, high-ash refuse-derived fuel in downdraft gasifier. **Energy**, v. 263, p. 125659, jan. 2023.

FERNANDES, D. C. **Adição de óleo para aumento da densidade de carga de carvões na coqueria**. Dissertação (mestrado)—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

FORTI BATTAGIN, A.; DALBON CARDOSO, F. **PANORAMA DO COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS EM FORNOS DE CIMENTO NO BRASIL AN OVERVIEW OF WASTE COPROCESSING IN CEMENT KILNS IN BRAZIL**. Foz do Iguaçu: 17 set. 2018. Disponível em: <[https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/PANORAMA\\_COPROCESSAMENTO\\_IBRACON\\_20.7.2018\\_.pdf](https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/PANORAMA_COPROCESSAMENTO_IBRACON_20.7.2018_.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2020

FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Management**, v. 27, n. 4, p. 533–538, 2007.

GAO, T. *et al.* Analysis of material flow and consumption in cement production process. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 553–565, 20 jan. 2016.

GARTNER, E.; SUI, T. Alternative cement clinkers. **Cement and concrete research**, v. 114, p. 27–39, 2018.

GHOSH, S. K.; PARLIKAR, U. V.; KARSTENSEN, K. H. Emission Considerations in Cement Kiln Co-processing. Em: **Sustainable Management of Wastes Through Co-processing**. Singapore: Springer Singapore, 2022. p. 179–195.

GLASSER, F. P. The Burning of Portland Cement. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, p. 195–240, 2003.

GONÇALVES, J. E. *et al.* Avaliação físico-química entre variedades de cana-de-açúcar visando o potencial para produção de etanol celulósico. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 16, n. 11, p. 28337–28356, 28 nov. 2023.

GROTTO, C. G. L. *et al.* Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **ForScience**, v. 9, n. 1, p. e00928, 1 abr. 2021.

HANSTED, A. L. S. *et al.* Use of a lignocellulosic residue as solid fuel: The effect of ash content in the energy potential. **Industrial Crops and Products**, v. 116, p. 209–214, jun. 2018.

HORSLEY, C.; EMMERT, M. H.; SAKULICH, A. Influence of alternative fuels on trace element content of ordinary portland cement. **Fuel**, v. 184, p. 481–489, nov. 2016.

HUANG, S. *et al.* Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from updraft fixed-bed biomass gasification ash. **Energy Conversion and Management**, v. 136, p. 108–118, mar. 2017.

HUSILLOS RODRÍGUEZ, N. *et al.* The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 94–102, 1 ago. 2013.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194–216, dez. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20847: Petroleum products - Determination of sulfur content of automotive fuels - Energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry**. [s.l.: s.n.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17828: Solid biofuels - Determination of bulk density**. [s.l.: s.n.].

JACKSON, P. J. Portland Cement: Classification and Manufacture. Em: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. [s.l.] Elsevier, 1998. p. 25–94.

JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A.; AJINKYA, S. D. Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121578, ago. 2020.

JÚNIOR, C. S.; COELHO, M. S.; SANTOS, J. M. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTOCAGEM NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE CARVÃO VEGETAL E COQUE DE PETRÓLEO. Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. **Anais...**Uberlândia: out. 2022.

JUNQUEIRA, H. S.; MEDEIROS, D. L.; COHIM, E. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 125–139, fev. 2022.

KLINE, J.; KLINE, C. Assessing Cement Plant Thermal Performance. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 4, p. 4097–4108, jul. 2017.

KUSUMA, R. T. *et al.* Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, p. 112503, jul. 2022.

LAGARINHOS, C. A. F.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. RECICLAGEM DE PNEUS USADOS NO BRASIL: REVISÃO DAS TECNOLOGIAS USADAS. 22º CBECiMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...**Natal: 6 nov. 2016.

LEAL, M. R. L. V. *et al.* Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11–19, jun. 2013.

LEMOS, S. V. *et al.* Economic efficiency of two baling systems for sugarcane straw. **Industrial Crops and Products**, v. 55, p. 97–101, abr. 2014.

LIMA, A. A. DA S.; STEFANUTTI, R. Production and Coprocessing of Refuse-Derived Fuel: A Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04389, 14 dez. 2023.

LIU, G. *et al.* Scenarios for sewage sludge reduction and reuse in clinker production towards regional eco-industrial development: a comparative energy-based assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 371–383, set. 2015.

LOBATO, M. F.; RODRIGUES, B. M. M.; SANTOS, A. G. DOS. Impacto da pandemia de COVID-19 nas emissões veiculares no Brasil no período de janeiro a maio de 2020. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 829–836, out. 2021.

LOPES, G. DE A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. DE. USO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS MADEIREIROS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 679–686, 20 jun. 2016.

LUDWIG, H.-M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 24–37, dez. 2015.

LUO, L. *et al.* Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, p. 1–6, 16 mar. 2016.

LUO, Q. *et al.* A Thermoelectric Waste-Heat-Recovery System for Portland Cement Rotary Kilns. **Journal of Electronic Materials**, v. 44, n. 6, p. 1750–1762, jun. 2015.

MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; DE CARVALHO, J. A. Energetic valorization of waste tires. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 306–315, fev. 2017.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 933–942, jun. 2018.

MADLOOL, N. A. *et al.* A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 2042–2060, maio 2011.

MAEDA, S. *et al.* **Estudo dos materiais calcários usados como corretivos da acidez do solo em Mato Grosso do Sul**. Dourados. EMBRAPA-CPAO. 1996. 22p. (EMBRAPA-CPAO. Boletim de Pesquisa, 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/240703/1/BP196.pdf>. Acesso em: 21 de dezembro de 2019

MALARD, A. A. MELO. **Avaliação ambiental do setor de coprocessamento no Estado de Minas Gerais**. 2016. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. 246p.

MARQUES, C. A. *et al.* Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e31211124675, 7 jan. 2022.

MORAES DOS SANTOS, G. F.; MASSANARES, B. F.; DOS SANTOS, A. M. Utilização de biomassas como combustível na produção de cimento Portland. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 12, n. 2, p. 18, 29 jun. 2019.

MARYOTO, A.; HERI SUDIBYO, G. Rice husk as an alternative energy for cement production and its effect on the chemical properties of cement. (P. Hajek *et al.*, Eds.)MATEC Web of Conferences. **Anais...**22 ago. 2018.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. Em: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. [s.l.] Elsevier, 1998. p. 471–635.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. Pozzolanas and Pozzolanic Materials. Em: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 363–467.

MEJEOUMOV, G. G. **Improved cement quality and grinding efficiency by means of closed mill circuit modeling**. Tese de Doutorado (for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY), Texas: Texas A&M University, dez. 2007.

MIKULČIĆ, H. *et al.* Environmental assessment of different cement manufacturing processes based on Energy and Ecological Footprint analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 130, p. 213–221, set. 2016.

MOLIN FILHO, R. A. DAL. **Viabilidade de queima da casca de eucalipto em fornos de cimento**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) UFSCar - Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba, Sorocaba, 2020. 80f.

MORAES, J. C. B. *et al.* Effect of sugar cane straw ash (SCSA) as solid precursor and the alkaline activator composition on alkali-activated binders based on blast furnace slag (BFS). **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 214–224, jul. 2017.

- MULINARI, D. R. *et al.* Caracterização térmica das fibras de bagaço de cana-de-açúcar tratadas para aplicação em luminária frigorífica. Congresso Brasileiro de Polímeros. **Anais...Foz do Iguaçu: Cubo Multimídia**, out. 2009.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. [s.l.] Bookman Editora, 2013.
- NUNES, J. V. D. S. *et al.* Briquetes de bagaço-de-cana (*Saccharum spp*): avaliação da produção em escala de bancada. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...Fortaleza**: jun. 2020.
- NURAZZI, N. M. *et al.* Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments. **Polymers**, v. 13, n. 16, p. 2710, 13 ago. 2021.
- NWANKWO, C. O. *et al.* High volume Portland cement replacement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 120445, nov. 2020.
- OBI, D.; ONYEKURU, S.; ORGA, A. Review of recent process developments in the field of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture from power plants flue gases and the future perspectives. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 43, n. 1, 31 dez. 2024.
- OLIVEIRA, F. A. C. *et al.* Portland cement clinker production using concentrated solar energy – A proof-of-concept approach. **Solar Energy**, p. 677–688, maio 2019.
- PIPILIKAKI, P. *et al.* Use of tire derived fuel in clinker burning. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7–8, p. 843–847, ago. 2005.
- PIRES, I. C. S. A. *et al.* Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, p. 8, 4 jul. 2018.
- PONTE, M. R. *et al.* Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019a.
- PONTE, M. R. *et al.* Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019b.
- PRADO, J. E. A. *et al.* Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira. **Revista Tecnologia e Sociedade**, p. 154, 15 set. 2022.
- QUISPE, I.; NAVIA, R.; KAHHAT, R. Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1235–1244, fev. 2019.
- RAHMAN, A. *et al.* Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, v. 145, p. 84–99, abr. 2015.
- RASHAD, A. M. A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, n. 2, p. 278–306, dez. 2015.

- RIGHI, E.; VARIANI, C.; DIAS, I. P. A. Mapeamento e gestão de resíduos em uma indústria moveleira da Serra Gaúcha, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, p. 987–998, 2018.
- RIVERA, R. A.; SANJUÁN, M. Á.; MARTÍN, D. A. Granulated Blast-Furnace Slag and Coal Fly Ash Ternary Portland Cements Optimization. **Sustainability**, jul. 2020.
- ROCHA, S. D. F.; LINS, V. DE F. C.; SANTO, B. C. DO E. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, p. 1–10, mar. 2011.
- RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO COM DIFERENTES TEORES DE MAGNÉSIO E GRANULOMETRIAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1723–1736, dez. 2015.
- SANTOS, G. H. F.; DO NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. **Revista Uningá Review**, v. 29, n. 2, 10 fev. 2017.
- SCALET, V. *et al.* Production of Briquettes from Licuri (*Syagrus coronata*) Bark Fruit and Sugarcane Straw. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, p. 50–58, 2018.
- SCHOON, J. *et al.* Waste fibre cement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 391–403, nov. 2012.
- SELLITTO, M. A. *et al.* Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n. 1, p. 141–162, mar. 2013.
- SERRANO-GONZÁLEZ, K.; REYES-VALDEZ, A.; CHOWANIEC, O. Impact of the use of alternative fuels on clinker reactivity. **Materiales de Construcción**, v. 67, n. 326, p. 15, 22 mar. 2017.
- SETTE JR., C. R. *et al.* Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 209–213, out. 2018.
- SHAPIRO, R. J. **The environmental effectiveness and economic efficiency of emissions caps and tradable permits, compared to carbon taxes**. [s.l: s.n.]. Reston, VA: The American Consumer Institute. Disponível em: [https://sonecon.com/docs/studies/climate\\_021407.pdf](https://sonecon.com/docs/studies/climate_021407.pdf). Acesso em: 21 de dezembro de 2019.
- SHARP, J. H. Surely we know all about cement – don't we? **Advances in Applied Ceramics**, v. 105, n. 4, p. 162–174, 18 ago. 2006.
- SMITH, A. K. DE G. *et al.* Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 138–143, fev. 2019.
- SNIC.; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Coprocessamento**. Disponível em: <<http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- SUÁREZ, S. *et al.* Parametrization of a Modified Friedman Kinetic Method to Assess Vine Wood Pyrolysis Using Thermogravimetric Analysis. **Energies**, v. 12, n. 13, p. 2599, 6 jul. 2019.

T. NAKASHIMA, G. *et al.* Lignocellulosic Materials: Characterization and Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 150–162, jan. 2017.

(THANOS) BOURTSALAS, A. C. *et al.* Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 8–16, 16 abr. 2018.

TSILYANNIS, C. A. Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment. **Energy**, v. 113, p. 1202–1218, 15 out. 2016.

TULASHIE, S. K. *et al.* Production of Portland pozzolana cement from rice husk ash. **Materialia**, v. 16, p. 10, maio 2021.

ULIASZ-BOCHENCZYK, A.; DEJA, J.; MOKRZYCKI, E. The use of alternative fuels in the cement industry as part of circular economy. **Archives of Environmental Protection**, v. 47, p. 109–117, 29 nov. 2021.

VEGA MEJÍA, R. D.; GALLARDO BRITO, E. M.; CESIN GRANADO, R. B. Inovador sistema anti perda de circulação com adição de coque de petróleo. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 7, n. 1, p. 23–33, 14 jul. 2020.

VISEDO, G.; ..PECCHIO, M.; OLIVEIRA, M. G. F. DE. **Roadmap Tecnológico do Cimento**. Rio de Janeiro: [s.n.].

WANG, J. *et al.* Manufacture of potassium chloride from cement kiln bypass dust: An industrial implementation case for transforming waste into valuable resources. **Heliyon**, v. 9, n. 11, p. 12, nov. 2023.

WI, K. *et al.* Use of an agricultural by-product, nano sized Palm Oil Fuel Ash as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, p. 139–149, 20 set. 2018.

WORRELL, E. *et al.* Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annual review of energy and the environment**, v. 26, n. 1, p. 303–329, 2001.

WZOREK, M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 104, p. 80–89, 1 dez. 2012.

YALÇINKAYA, Ç.; ÇOPUROĞLU, O. Hydration heat, strength and microstructure characteristics of UHPC containing blast furnace slag. **Journal of Building Engineering**, v. 34, fev. 2021.

ZHANG, S. *et al.* Use of municipal solid waste incineration bottom ash as a supplementary cementitious material in dry-cast concrete. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 12, 10 jan. 2021.