

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

VICENTE BUENO VERDIANI

**VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM
UTILIZAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO NA
INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Sorocaba - SP
2024

VICENTE BUENO VERDIANI

**VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM
UTILIZAÇÃO DA CASCA DE CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO NA
INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, para obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Linha de pesquisa: Energia de Biomassa

Orientador: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Coorientador: Dra. Gabriela Bertoni Belini

Sorocaba - SP
2024

Bueno Verdiani, Vicente

Viabilidade técnica e potencial de redução de custo com utilização da casca de café como combustível alternativo na indústria cimenteira / Vicente Bueno Verdiani -- 2024. 92f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Fábio Minoru Yamaji

Banca Examinadora: João Lúcio de Barros, João Otávio Poletto Tomeleri, Leonardo Moreira de Lima

Bibliografia

1. Biomassa da casca de café. 2. Coprocessamento energético na indústria do cimento. 3. Viabilidade técnica, potencial de redução nas emissões de CO2 e potencial de redução dos custos com combustível fóssil. I. Bueno Verdiani, Vicente. 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 Dissertação de Mestrado do candidato Vicente Bueno Verdiani, realizada em 22/03/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Prof. Dr. João Lúcio de Barros (IFSP)

Prof. Dr. João Otávio Poletto Tomeleri (UFSCar)

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.

VICENTE BUENO VERDIANI

VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM
UTILIZAÇÃO DA CASCA DE CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO NA
INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, para obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Sorocaba, ____ de _____ de 2024.

Orientador

Coorientador

Dr. Fábio Minoru Yamaji

Dra. Gabriela Bertoni Belini

Universidade Federal de São Carlos

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação

Dr. João Lúcio de Barros

Dr. João Otávio Poletto Tomeleri

Dr. Leonardo Moreira de Lima

AGRADECIMENTOS

A minha família que me deu suporte e apoio para realização deste projeto e aos meus amigos que compartilharam seus conhecimentos nas longas conversas e discussões sobre o tema.

Agradeço a Votorantim Cimentos e ao meu gestor pela oportunidade, apoio e incentivo a esse desenvolvimento profissional e pessoal.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji a Dr. Gabriela Bertoni Belini e a UFSCar pelo apoio para realização deste trabalho.

RESUMO

VERDIANI, V.B. **VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM A UTILIZAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**. 2024. 92 f. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, campus Sorocaba, no programa de pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis (PPGPUR).

Foi estudada a capacidade de utilização da biomassa casca de café como fonte de energia renovável no coprocessamento para fabricação de clínquer, com seus efeitos ao produto cimento e seu potencial de redução nos custos de combustível e emissões de CO₂. A casca de café é um subproduto oriundo do processamento a seco do fruto do café, sendo gerado 1kg de casca para cada 1kg de fruto processado. O Brasil é o maior produtor global de café com uma safra, em 2022, de 3,17 milhões de toneladas. Foram realizados ensaios de caracterização da casca do café como combustível alternativo em substituição ao coque de petróleo para utilização no pré-calcinador (torre de ciclones). Para o estudo foram feitos os seguintes ensaios: granulometria, análise imediata, umidade base seca e úmida, poder calorífico inferior, superior e útil, teor de cloretos, densidade aparente, termogravimetria, espectrometria de fluorescência de raio-x, potencial de redução de custo na substituição do coque pela biomassa, potencial de redução nas emissões de CO₂ na substituição para validação da sua utilização no coprocessamento. Os resultados obtidos mostraram que esta biomassa pode ser utilizada, pois possui poder calorífico inferior de 3498 kcal/kg e os resíduos presentes na cinza, oriunda da queima, não impactam na qualidade do cimento produzido. Na análise do potencial de redução dos custos com combustível, realizada com uma substituição de 15% de coque por biomassa, obteve-se uma redução estimada de R\$ 6,06 milhões/ano. Estimativas do potencial de redução das emissões de CO₂ no processo, indicam uma redução de 1,6 toneladas de CO₂ para cada tonelada de coque substituído.

Palavras-chave: biomassa, cimento Portland, gases efeito estufa, coprocessamento energético.

ABSTRACT

VERDIANI, V.B. TECHNICAL FEASIBILITY AND COST REDUCTION POTENTIAL WITH THE USE OF COFFEE HUSK AS AN ALTERNATIVE FUEL IN THE CEMENT INDUSTRY. 2024. 92 pages dissertation presented to the Federal University of São Carlos – UFSCar, Sorocaba campus, in the postgraduate program in Planning and Use of Renewable Resources (PPGPUR).

The ability to use coffee husk biomass as a source of renewable energy in co-processing for the manufacture of clinker was studied, with its effects on the cement product and its potential for reducing fuel costs and CO₂ emissions. Coffee husks are a by-product resulting from the dry processing of coffee fruit, with 1kg of husk being generated for every 1kg of fruit processed. Brazil is the largest global coffee producer with a harvest, in 2022, of 3.17 million tons. Tests were carried out to characterize the coffee husk as an alternative fuel to replace petroleum coke for use in the pre-calciner (cyclone tower). For the study, the following tests were realized: granulometry, immediate analysis, dry and wet base humidity, lower and higher heating value, chloride content, apparent density, thermogravimetry, x-ray fluorescence spectrometry, potential cost reduction in replacing the coke by biomass, potential reduction in CO₂ emissions when replacing to validate its use in co-processing. The results obtained showed that this biomass can be used, as it has a lower heating value of 3498 kcal/kg and the residues present in the ash, resulting from burning, do not impact the quality of the cement produced. In the analysis of the potential for reducing fuel costs, carried out with a 15% replacement of coke by biomass, an estimated reduction of R\$ 6.06 million/year was obtained. Estimates of the potential for reducing CO₂ emissions in the process indicate a reduction of 1.6 tons of CO₂ for each ton of coke replaced.

Keywords: biomass, Portland cement, greenhouse gases, coprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Argamassa e concreto	19
Figura 2 - Maiores produtores globais de cimento em milhões de toneladas.....	20
Figura 3 – Distribuição do consumo de energia na fabricação do cimento.....	21
Figura 4 - Modelo esquemático da produção de cimento Portland	23
Figura 5 - Modelo esquemático da etapa de transformação da farinha crua em clínquer	24
Figura 6 - Redução nas emissões de CO ₂ com incremento do % de adição de escória	26
Figura 7 - Principais combustíveis utilizados pela indústria do cimento no Brasil.....	28
Figura 8 - Tipos de combustíveis utilizados na indústria do cimento	29
Figura 9 - Torre de ciclones.....	30
Figura 10 - Exemplo de um HotDisc.....	30
Figura 11 - Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, no tempo de início de pega da argamassa de cimento.....	32
Figura 12 - Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, na resistência à compressão da argamassa do cimento	32
Figura 13 – Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, na fluidez da argamassa de cimento após 5 minutos da mistura.....	33
Figura 14 - Percentual dos combustíveis alternativos utilizados no Brasil	36
Figura 15 - Evolução na utilização de pneus inservíveis na indústria cimenteira no Brasil	37
Figura 16 - Taxas de substituição de coque de acordo com o tipo de biomassa	41
Figura 17 - Biomassas lignocelulósicas	43
Figura 18 - Representação do processo de beneficiamento do fruto do café	44
Figura 19 - Amostra da casca de café.....	47
Figura 20 - Homogeneização da casca de café.....	48
Figura 21 - Quarteamento da amostra de café e modelo de coleta.....	48
Figura 22 - Diagrama de funcionamento do equipamento de calorimetria	50
Figura 23 - Orientação para montagem das peneiras e equipamento de agitação	53
Figura 24 - Espectômetro de fluorescência de Raio-X.....	57
Figura 25 - Ensaio de densidade aparente	59
Figura 26 - Mesa de adensamento para ensaio de RH.....	60
Figura 27 - Entalhe no sistema da mesa de adensamento para geração do impacto	61
Figura 28 - Colocação da casca de café no recipiente.....	61
Figura 29 - Ensaio de TGA.....	68
Figura 30 – Variação da densidade em função do número de golpes	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento utilizados no Brasil	21
Tabela 2 - Limites superior de emissões gasosas - Norma técnica CETESB P4.263	27
Tabela 3 - Propriedades de alguns dos combustíveis alternativos utilizados	35
Tabela 4 - Dados de biomassa utilizadas na indústria cimenteira	40
Tabela 5 - Análise química da casca de café	44
Tabela 6 - Análise química da cinza resultante da queima da casca de café.....	45
Tabela 7 - Análise elementar da casca do café.....	50
Tabela 8 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria	52
Tabela 9 - Análise imediata do coque de petróleo.....	55
Tabela 10 - Ensaio de umidade base seca e base úmida.....	63
Tabela 11 – Resultados de PCS, PCI e PCU	64
Tabela 12 - PCS e PCI de outras biomassas	64
Tabela 13 - Viabilidade econômica da utilização da casca de café.....	66
Tabela 14 - Ensaio de granulometria	67
Tabela 15 - Análise Imediata da casca do café.....	69
Tabela 16 – Potencial de redução de emissão de CO ₂ da casca do café.....	71
Tabela 17 - Resultado da espectrometria de fluorescência de Raio-X	71
Tabela 18 - Resultado de densidade aparente.....	73
Tabela 19 - Demanda de casca de café e comparativo volume ocupado	73
Tabela 20 - Escoabilidade em função da RH	74
Tabela 21 - Ensaio da RH.....	75
Tabela 22 - Comparativo entre biomassas.....	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo da umidade na base seca	49
Equação 2 - Cálculo da umidade na base úmida	49
Equação 3 - Cálculo do PCI	50
Equação 4 - Cálculo do PCU	51
Equação 5 - Cálculo de material volátil (%) (5).....	54
Equação 6 - Cálculo do teor de cinzas.....	54
Equação 7 - Cálculo do teor de carbono fixo (7).....	55
Equação 8 - Cálculo do fator de emissão de C do coque de petróleo.....	55
Equação 9 - Cálculo da emissão de CO ₂ por tonelada de coque de petróleo	55
Equação 10 - Cálculo da quantidade necessária de combustível alternativo na substituição...	56
Equação 11 - Cálculo do potencial de redução de emissão de CO ₂ pela substituição	56
Equação 12 - Razão base / ácida	57
Equação 13 - Índice de incrustação	58
Equação 14 - Cálculo da densidade aparente	58
Equação 15 - Cálculo da razão de Hausner (RH).....	59

LISTA DE REAÇÕES QUÍMICAS

Reação Química I - Calcinação do carbonato de cálcio	23
Reação Química II - Formação da fase Belita (C_2S)	23
Reação Química III - Formação da fase Alita (C_3S)	23
Reação Química IV - Formação do aluminato tri-cálcico (C_3A)	24
Reação Química V - Formação do ferro-aluminato tetra-cálcico (C_4AF)	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland;

ABESC - Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem do Brasil;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACV - Análise do Ciclo de Vida;

AFPM - American Fuel & Petrochemical Manufacturers;

AFR - Alternative fuels and raw materials;

BEN - Balanço Energético Nacional;

C₂S - Silicato dicálcico;

C₃A - Aluminato tricálcico;

C₃S - Silicato tricálcico;

C₄AF - Ferro-aluminato tetracálcico;

CaCO₃ - Carbonato de cálcio;

CaO - Óxido de cálcio;

CDR - Combustível derivado de resíduo;

CESTEB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;

CKD - Cement kiln dust;

CNI - Confederação Nacional da Indústria;

CO - Monóxido de carbono;

CO₂ - Dióxido de carbono;

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento;

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente;

CP - Cimento Portland;

EPD - Environmental Product Declaration;

EPS - Poliestireno expandido;

FeC - fator de emissão de carbono;

GCCA - Global Cement and Concrete Association;

GHG - Greenhouse gas;

GWP - Global warming potential;

HCl - Ácido clorídrico;

HF - Ácido fluorídrico;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

II - Índice de incrustação;

maq - Massa de biomassa seca antes da queima;

MBM - Meat and bone meal (Resíduo animal);
Mens - Massa do material ensaiado somada a massa do recipiente;
MF - Módulo de finura;
Mpq - Massa de biomassa pós queima;
Mrec - Massa do recipiente utilizado no ensaio;
 m_s - Massa seca;
Mtep - Milhões de toneladas equivalente de petróleo;
 m_u - Massa úmida;
Mv - Material volátil (%);
NBR - Norma brasileira;
NO_x - Óxidos de nitrogênio;
PCI - Poder calorífico inferior;
PCS - Poder calorífico superior;
PCU - Poder calorífico útil;
Rb/a - Razão base/ácida;
RH - Razão de Hausner;
RSM - Resíduo sólido municipal;
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento;
SO₂ - Dióxido de enxofre;
SPL - Spent pot lining;
Tc - Teor de cinzas (%);
TCf - Teor de carbono fixo (%);
TGA - Análise Termogravimétrica;
Ubs - Umidade base seca;
Ubu - Umidade base úmida;
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;
UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos;
Vrec - Volume do recipiente utilizado no ensaio;
WBCSD - World Business Council for Sustainable Development;
 ρ_{ap} - Densidade aparente;
 ρ_{aps} - Densidade aparente solta;
 ρ_{cp} - Densidade compactada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A INDÚSTRIA DO CIMENTO	18
2.2	CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	21
2.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	22
2.4	POTENCIAL DE EMISSÕES DE CO ₂ eq NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	25
2.4.1	Uso de adições no cimento Portland	25
2.4.2	Coprocessamento	26
2.4.3	Uso de combustíveis fósseis e AFR	27
2.4.3.1	Influência de elementos menores e traços à qualidade do clínquer	31
2.5	VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO NOS CUSTOS DO COMBUSTÍVEL COM O USO DO COPROCESSAMENTO	33
2.6	UMA VISÃO GERAL DOS AFR UTILIZADOS E SUA EFICIÊNCIA DE SUBSTITUIÇÃO	34
2.6.1	Pneus inservíveis	36
2.6.2	Resíduos sólidos municipais e Combustível derivado de resíduo	38
2.6.3	Biomassa	39
2.6.3.1	Resíduo do processamento do café	42
3	MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1	ENSAIO DE UMIDADE NA BASE SECA E NA BASE ÚMIDA	48
3.2	ENSAIO DE PODER CALORÍFICO – PCS, PCI E PCU	49
3.3	POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL UTILIZANDO AFR	51
3.4	ENSAIO DE GRANULOMETRIA	52
3.5	ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA – TGA	53

3.6	ENSAIO DE TEOR DE CLORETOS (%).....	53
3.7	ANÁLISE IMEDIATA	54
3.8	POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO ₂	55
3.9	ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	56
3.10	ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE	58
3.11	RAZÃO DE HAUSNER	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	ENSAIO DE UMIDADE NA BASE SECA E NA BASE ÚMIDA	63
4.2	ENSAIO DE PODER CALORÍFICO – PCS, PCI E PCU	64
4.3	POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL UTILIZANDO AFR	65
4.4	ENSAIO DE GRANULOMETRIA	67
4.5	ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA – TGA	68
4.6	ENSAIO DE TEOR DE CLORETOS (%).....	69
4.7	ANÁLISE IMEDIATA	69
4.8	POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO ₂	70
4.9	ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	71
4.10	ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE	72
4.11	RAZÃO DE HAUSNER	73
4.12	RESUMO	75
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é uma grande emissora de gases de efeito estufa, o valor corresponde a 7% das emissões globais de CO₂ que respondem por 4% do aquecimento global (Rodrigues e Joekes, 2011; WBCSD, 2018). A principal e mais eficiente alternativa para redução nas emissões é a redução no teor de clínquer no cimento através da utilização de adições como pozolana, escória de alto forno ou aciaria e filler calcário, pois 50% das emissões de CO₂ no processo está associada à calcinação do calcário (Ammenberg *et al.*, 2015). A utilização de combustível alternativo se mostra como uma segunda opção e bastante eficiente visto que 40% das emissões estão associadas a queima do combustível (International Energy Agency, 2018). Essa alternativa é conhecida como coprocessamento energético e ocorre na etapa quente do processo em substituição do coque de petróleo ou carvão mineral na etapa de aquecimento e queima da matéria-prima, também conhecida como farinha de cru, para fabricação do clínquer (WBCSD, 2014).

O uso da biomassa na indústria do cimento é uma excelente alternativa para redução da emissão dos gases de efeito estufa, visto que a biomassa é considerada um combustível carbono neutro, ou seja, a emissão oriunda do processo de queima será absorvida pela fotossíntese da próxima safra (Associação Latino-Americana de Geração de Energia Renovável, 2023).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) mostram uma safra de café de 3,17 milhões de toneladas, no Brasil, em 2022. No processo de beneficiamento do café aproximadamente 50% são resíduos, onde a casca do café é o principal resíduo gerado no processo (Comério *et al.*, 2016; Saenger *et al.*, 2001; Vegro e Carvalho, 1994).

A casca do café é uma biomassa com potencial de utilização como fonte de energia térmica, visto que seu poder calorífico é similar ao do bagaço da cana-de-açúcar e sua utilização para produção de energia se mostrou apropriada (Dal-Bó *et al.*, 2019). Para o ano de 2023 a safra projetada é de 50,92 milhões de sacas de café, o que corresponde a 3,06 milhões de toneladas (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023).

Para o uso de combustíveis alternativos na indústria do cimento, também conhecido como *alternative fuels and raw materials* (AFR), primeiro é necessário que exista uma larga disponibilidade de material, mesmo que de maneira sazonal, visto que o processo de fabricação de cimento demanda alta quantidade de energia (Hasanbeigi; Price; Lin, 2012). A logística é outro ponto que deve ser considerado, segundo Souza e D'Agosto (2013) o custo logístico representa mais de 60% dos custos do AFR estudado, sendo o transporte o grande responsável. No caso de biomassas, a sua baixa densidade influencia diretamente o seu custo de transporte

e armazenagem tornando inviável o transporte a longas distâncias (Nogueira e Lora, 2003). Os custos de transporte são inversamente proporcionais ao Poder Calorífico Superior (PCS) e a densidade aparente (ρ_{ap}), ou seja, quanto menores estes valores mais altos os custos logísticos associados à biomassa (García *et al.*, 2017). Entretanto, o estudo considerou os estados de Minas Gerais e São Paulo, que são os maiores produtores nacionais de café e cimento com 53% e 37% da produção nacional de 2022 respectivamente (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023a; Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023a).

O objetivo do estudo foi a caracterização físico-química da casca de café, a avaliação do potencial de redução de custo com combustível, os potenciais impactos na qualidade do cimento e o potencial de redução das emissões de CO₂ associadas a queima de combustível com a utilização da casca de café como combustível alternativo em substituição ao coque de petróleo na torre de ciclones.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Avaliando as publicações no sistema Scopus sobre o uso da casca do café em fornos de cimento, foram feitas diferentes pesquisas sempre com as palavras da busca limitadas aos campos de título, abstrato e palavras chaves e sem limitação de ano ou idioma. Na primeira busca, limitadas sempre a artigos, as palavras utilizadas foram “*coffee husk and cement*”. Nesta primeira busca foram encontrados 22 artigos, de 2008 à 2023, no entanto nenhum destes artigos estudou o uso da casca de café como combustível alternativo no coprocessamento. Um ponto interessante é que o Brasil foi o país com mais publicações, totalizando 10.

Foi realizada uma nova pesquisa apenas com a alteração das palavras chaves da pesquisa para “*coffee husk and coprocessing*”, porém não houve registro. Foi realizada então uma terceira pesquisa de maneira mais ampla, considerando a utilização das cascas de café como combustível alternativo, novamente sem limitação de ano, idioma e com as palavras de busca nos campos de título, abstrato e palavras chaves. Neste caso, quando foi buscado: “*coffee husk and alternative fuels*”, foram 24 artigos de 2008 até 2024. O Brasil figura novamente como o país com mais publicações, 10 no total. Destes 24 artigos nenhum tinha como objeto de estudo o uso da casca de café como combustível alternativo da indústria de cimento, alguns artigos falavam do uso de briquetes da casca de café como fonte energética: *Production and Characterization of Coffee Husk Fuel Briquettes as an Alternative Energy Source* (Tesfaye et al., 2022); *Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis* (Setter et al., 2020); *Pelletization of Eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bionergy production* (De Souza et al., 2020).

Quando realizada a pesquisa de artigos convergindo para a utilização da casca de café como combustível alternativo na indústria do cimento, com os mesmos parâmetros utilizados nas pesquisas anteriores e com as seguintes palavras buscadas “*coffee husk and alternative fuels and cement*”, apenas 1 artigo retornou: *Green Route to Developing Africa* (Idle, 2008). A descrição do artigo no abstrato falava do uso de cascas de café e arroz no forno de calcinação e, na consequente redução do consumo de combustível fóssil.

A pesquisa “*coffee husk and alternative fuels and cement industry*” ou “*coffee husk and alternative fuels and coprocessing*” não retornaram resultados na busca.

A pesquisa de artigos, sem restrição de idioma e ano, pelas palavras chaves em qualquer campo de “*coffee husk and alternative fuels and combustion*” retornou 6 artigos todos publicados entre 2012 e 2020, porém nenhum falava especificamente do uso de casca de café no coprocessamento em fornos de cimento.

Quando comparamos a análise acima com as publicações de artigos sobre o tema biomassa como fonte de energia na indústria cimenteira, sem limitação de ano e idioma, com as palavras buscadas nos campos título, abstrato e palavras chaves (pesquisa: “*biomass and energy and cement*”) temos 343 artigos, com a primeira publicação no ano de 1980. Isso demonstra que o estudo do tema não é novo (44 anos), porém houve uma intensificação da pesquisa sobre, dado que entre 1980 e 1999 foram publicados apenas 5 artigos, ou seja, 1,5% do total. A partir do ano de 2008 temos uma maior quantidade de publicações, sendo que o período de 2008 a 2024 corresponde a 94,8% do total de publicações.

Desconsiderando as 14 publicações de 2024 até o momento, pois o ano ainda não está completo e considerando de 2018 à 2023 que são os últimos 5 anos completos, temos um total de 59,6% das publicações.

Tal análise mostra uma tendência de crescimento nas pesquisas relacionadas ao tema de biomassa como fonte de energia na indústria, porém com nenhuma pesquisa específica sobre o uso da casca de café.

Dentre os países com mais publicações no tema, baseado na pesquisa “*biomass and energy and cement*” temos a China seguida pela Índia, Estados Unidos, Espanha e Brasil. Estes países representam 52,2% das publicações.

2.1 A INDÚSTRIA DO CIMENTO

O cimento é o produto manufaturado mais produzido, em massa, pelo homem (Scrivener, John e Gartner, 2018). É um material inorgânico que quando misturado com água possui propriedades ligantes.

Sua utilização pela humanidade é antiga, sendo os primeiros registros de 4500 anos atrás, já o cimento moderno que conhecemos hoje, se originou de experimentos realizados entre os séculos XVIII e XIX por John Smeaton, Vicat e Joseph Aspdin, sendo este último inclusive o criador do nome cimento Portland devido à semelhança do produto com as rochas da ilha de Portland (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023a).

No Brasil a história remonta de algumas tentativas no final do século XIX, entretanto 97% do cimento consumido no país era importado até então. A grande virada ocorreu com a instalação da fábrica em Perus/SP da Companhia Brasileira de Cimento Portland em 1926, tendo início no país a fabricação de cimento em escala industrial e, em 1933, com a instalação de uma segunda fábrica na cidade de São Gonçalo/RJ, ano que a produção nacional supera a importação do produto pela primeira vez (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023b).

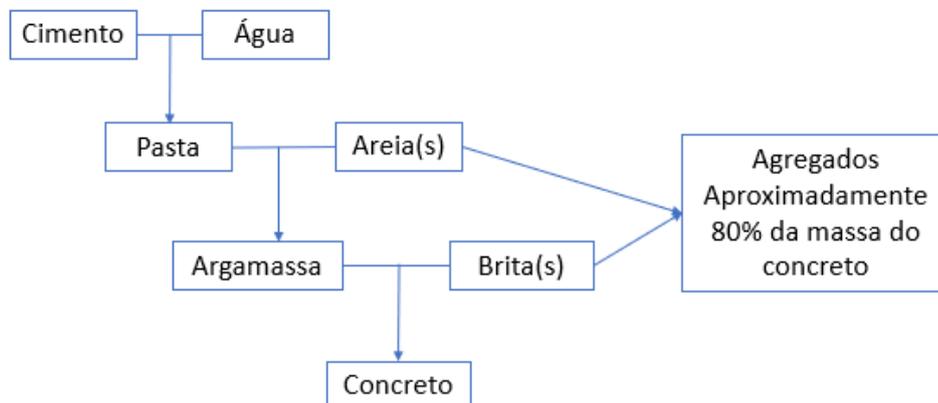
As perspectivas futuras para o produto são otimistas, existe no Brasil um grande déficit habitacional que deve ser impulsionado por programas habitacionais, pela queda da taxa de juros básica Selic e facilidade de acesso ao financiamento. O mercado de infraestrutura como saneamento e rodovias também são mercados promissores e que demandam alto volume de cimento (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023b).

A norma brasileira NBR 16697 (2018) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) definiu o cimento Portland como ligante hidráulico obtido da moagem do clínquer com uma ou mais adições minerais e sulfato de cálcio.

Diversos produtos têm como matéria prima principal o cimento, por exemplo: argamassas, concreto, artefatos de concreto, telhas de fibro cimento etc. Segundo Horsley, Emmert e Sakulich (2016) e Scrivener, John e Gartner (2018) o concreto é o segundo material mais consumido do mundo, atrás apenas da água.

A Figura 1 exemplifica alguns dos produtos.

Figura 1 - Argamassa e concreto

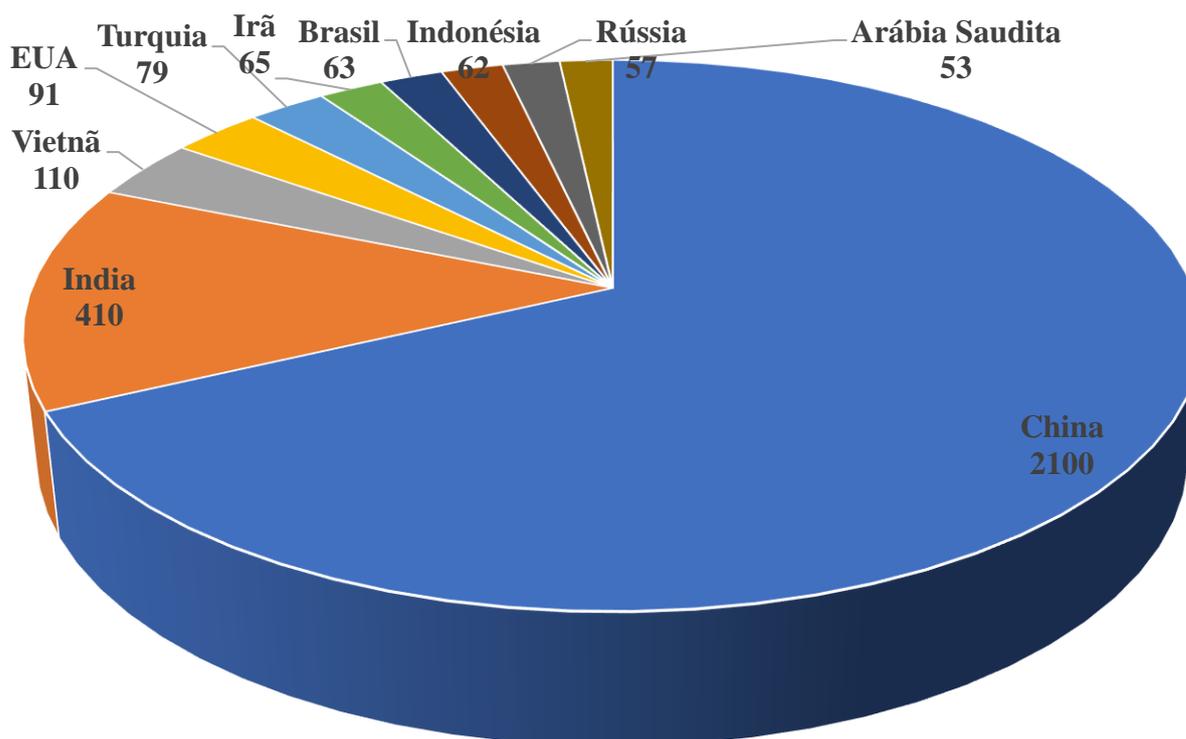


Fonte: adaptado Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem do Brasil (ABESC) (2022).

Segundo Scrivener, John e Gartner (2018) os motivos que transformaram a produção de cimento em uma indústria difundida globalmente são: a alta oferta de matéria-prima em praticamente todos os países do globo, sua versatilidade como fonte de matéria-prima para os mais diversos produtos: pasta, argamassa e concreto; excelentes propriedades físico-química tendo capacidade de ser aplicado em diferentes meios; versatilidade nas propriedades mecânicas atendendo as mais diversas solicitações construtivas, no entanto seu baixo custo tornam os custos de transporte um fator chave, sendo consumido e produzido localmente.

A China aparece na primeira posição como o maior produtor global, seguido de Índia e EUA e o Brasil é o maior produtor da América Latina com uma produção de 63,5 milhões de toneladas em 2022 segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2024). A Figura 2 mostra os maiores produtores globais de cimento, baseado em números da produção de 2023.

Figura 2 - Maiores produtores globais de cimento em milhões de toneladas



Fonte: adaptado de Statista (2024)

O clínquer é a matéria prima básica para a produção do cimento Portland (CP). A ABNT NBR 16697 (2018) define o clínquer Portland como a matéria prima principal para a obtenção do cimento, constituído de silicato de cálcio na sua maior parte e, que quando misturado com água, possui característica de ligante hidráulico. O clínquer é obtido pela queima de carbonato de cálcio, argila e correções se necessário.

Esta norma estabelece diversos tipos de cimentos, a depender da quantidade e tipo de aditivo adicionado ao clínquer no processo produtivo, a saber: CP comum, CP composto, CP de alta resistência inicial (ARI), CP de alto-forno e CP pozolânico.

A Tabela 1, adaptada da norma NBR evidencia os tipos de cimento e as respectivas adições.

Tabela 1 - Tipos de cimento utilizados no Brasil

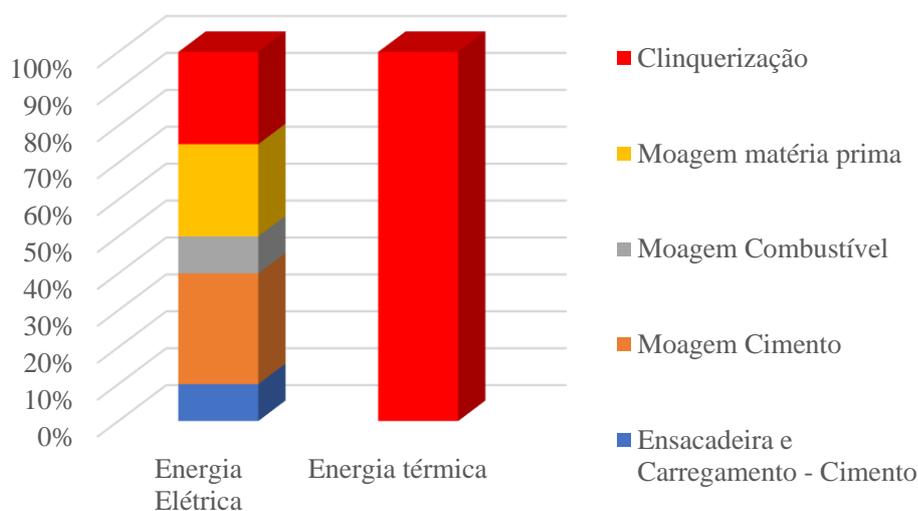
Designação	Sigla	Clínquer + Sulfato de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP comum	CP I	95 – 100		0 - 5	
CP composto com escória	CP II-E	51 – 94	6 – 34	-	0 - 15
CP composto com pozolana	CP II-Z	71 – 94	-	6 – 14	0 – 15
CP composto com material carbonático	CP II-F	75 – 89	-	-	11 – 25
CP de alto forno	CP III	25 – 65	35 – 75	-	0 – 10
CP pozolânico	CP IV	45 – 85	-	15 – 50	0 – 10
CP de alta resistência inicial	CP V	90 – 100	-	-	0 – 10

Fonte: adaptada da norma ABNT NBR 16697 (2018).

2.2 CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

A Figura 3 mostra a distribuição no consumo de energia elétrica e térmica no processo de fabricação do cimento.

Figura 3 – Distribuição do consumo de energia na fabricação do cimento



Fonte: adaptado de Madlool *et al.*, (2011) e Technology Roadmap (International Energy Agency, 2018).

O clínquer é a base para a fabricação do CP atual e, seu processo produtivo requer uma grande quantidade de energia, sendo responsável por 5 a 7% do total de energia consumida pelas indústrias globalmente (Hasanbeigi, Price e Lin, 2012; Huntzinger e Eatmon, 2009; International Energy Agency, 2018; Worrell *et al.*, 2001).

O processo de fabricação de 1 tonelada de clínquer demanda, em média, entre 3,15 a 3,65 GJ de energia (processo via seca) e 1,7 toneladas de matéria-prima (Ishak e Hashim, 2015; Rahman *et al.*, 2015). Ishak e Hashim (2015) detalham que o processo de via úmida demanda uma quantidade média muito superior, 5,3 a 7,1 GJ/t, sendo este menos eficiente que os processos mais modernos.

A maior parte da energia térmica consumida no processo está no processo de queima da farinha também conhecida como clinquerização. Já a energia elétrica consumida, que está na faixa de 110 a 120 kWh/t de cimento, está associada às etapas de moagem (Rahman *et al.*, 2015).

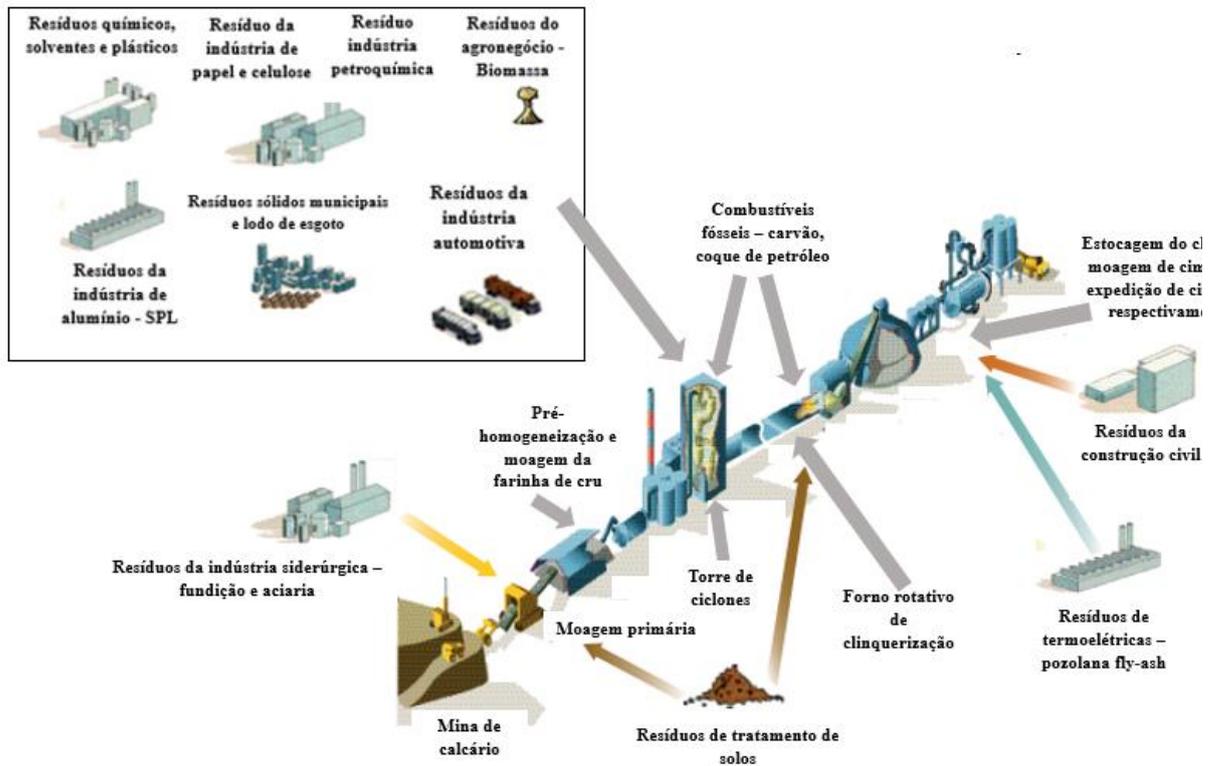
O relatório síntese de 2022 do Balanço Energético Nacional (BEN) mostrou que o segmento industrial consumiu 32,3% de toda energia gerada no Brasil que foi de 262,1 milhões de toneladas equivalente de petróleo (Mtep) em 2021. Somente a indústria do cimento apresentou um crescimento no consumo de energia de 2020 para 2021 de 5,6% (BEN - Relatório Síntese, 2021).

2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

O processo resumido da fabricação do CP consiste na extração de calcário e argila, que são as duas matérias primas principais para a fabricação do clínquer. A depender da qualidade das matérias primas, podem ser necessárias correções com: minério de ferro, sílica e bauxita. O calcário, argila e correções são misturados nas proporções adequadas, moídos e homogeneizados e desta mistura se origina a farinha crua que é direcionada ao processo de queima, que pode ser dividido em 4 etapas: pré-aquecimento, calcinação, clinquerização e resfriamento (Lima, 2011; UFSC, 2023).

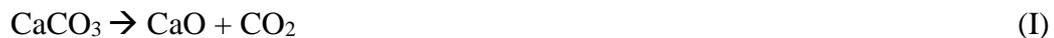
A torre de ciclones otimiza o processo e a energia necessária para fazer o pré-aquecimento e iniciar o processo de descarbonatação da farinha de cru (Oliveira *et al.*, 2019). O modelo esquemático de produção do cimento pode ser visualizado na Figura 4, já considerando as potenciais oportunidades de utilização de combustíveis alternativos.

Figura 4 - Modelo esquemático da produção de cimento Portland



Fonte: adaptado de World Business Council for Sustainable Development - WBCSD (2014b).

Na torre de ciclones existem pontos de queima que fornecem energia térmica e auxiliam a otimização do processo (Mantegazza, 2004). Muitos dos combustíveis alternativos utilizados entram nesta etapa do processo. A farinha crua atinge aproximadamente 900°C iniciando a calcinação próxima à entrada no forno (Reação Química I) (International Energy Agency, 2018).



Dentro do forno a temperatura atinge até 2000°C na chama, porém a farinha crua, pós etapa de calcinação, é aquecida a aproximadamente 1450°C, passando por transformações e formando as quatro fases principais do clínquer (Confederação Nacional da Indústria - CNI, 2023). As fases silicato dicálcico (Reação Química II) e silicato tricálcico (Reação Química III) correspondem a aproximadamente 70% à 80% das fases do clínquer (Guia da Engenharia, 2020):

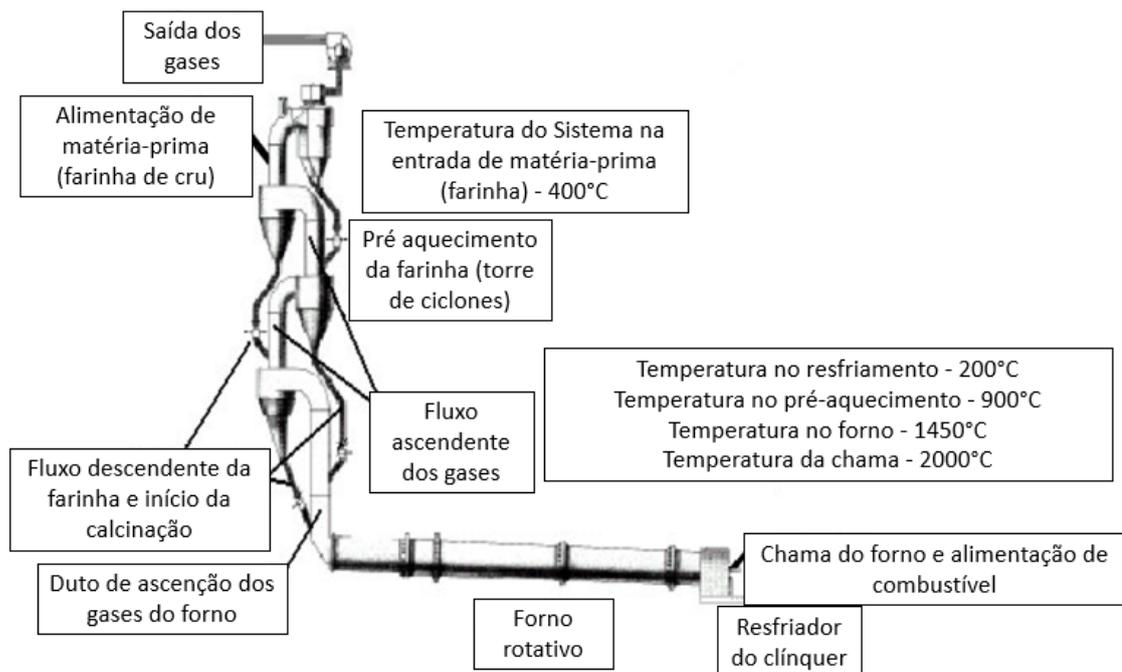


As outras 2 fases presentes no clínquer, em quantidade menor (aproximadamente 20% das fases), são o aluminato tricálcico (Reação Química IV) e o ferro-aluminato tetracálcico (Reação Química V) (Mantegazza, 2004; Oliveira *et al.*, 2019; Rahman *et al.*, 2015).



Após esta etapa o clínquer passa por um resfriamento forçado para aproximadamente 200°C, mantendo assim as 4 fases C₂S, C₃S, C₃A e C₄AF em equilíbrio metaestável à temperatura ambiente (Costa *et al.*, 2013). A Figura 5 exemplifica a etapa quente para a fabricação do clínquer.

Figura 5 - Modelo esquemático da etapa de transformação da farinha crua em clínquer



Fonte: adaptado de Mantegazza (2004).

A farinha crua entra pela torre de ciclones, iniciando o processo de aquecimento e início da calcinação. Ao final da torre de ciclones a farinha já aquecida entra no forno rotativo para a transformação em clínquer que passa por um resfriamento forçado ao final do processo (Mantegazza, 2004). Combustíveis alternativos são utilizados nesta etapa, em substituição ao carvão ou coque de petróleo. Estes são utilizados tanto na torre de ciclones como diretamente no forno rotativo (Mantegazza, 2004; Rahman *et al.*, 2015; WBCSD, 2014).

2.4 POTENCIAL DE EMISSÕES DE CO₂eq NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

2.4.1 Uso de adições no cimento Portland

O processo de fabricação do CP é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (WBCSD, 2018).

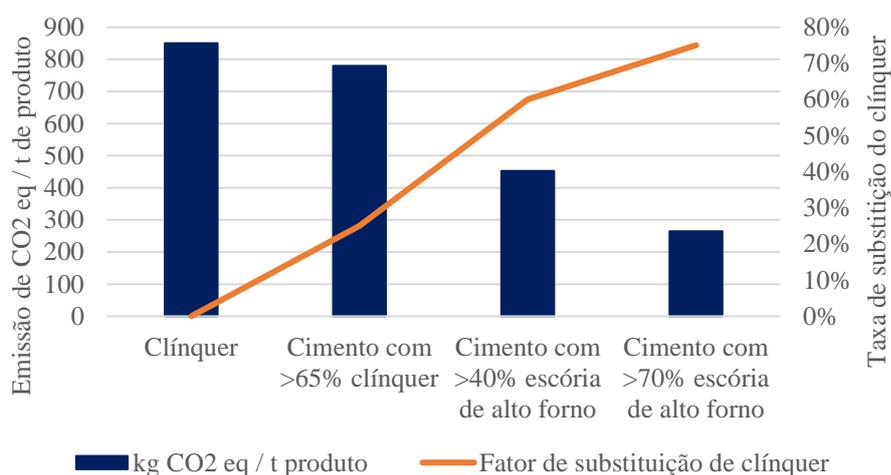
De acordo com Mahasenán, Smith e Humphreys (2003) grande parte da liberação de CO₂ na produção de cimento ocorre na etapa de calcinação da farinha, etapa prévia à clínquerização, com 50% das emissões nesta etapa, quando o CaCO₃ se transforma em CaO e há a liberação de CO₂. Outros 40% estão relacionados à queima de combustíveis fósseis e os 10% restantes estão atrelados a atividade de mineração, transporte e consumo elétrico (Mahasenán, Smith e Humphreys, 2003).

Para a fabricação de CP, estima-se uma liberação de 0,73 a 0,99 t CO₂/t de cimento, valor que varia de acordo com o tipo de cimento e eficiência operacional (Hasanbeigi, Price e Lin, 2012).

As emissões de CO₂ são influenciadas pelo fator clínquer, que é a quantidade de clínquer presente na composição do cimento, pelo tipo de combustível e pela fonte energética utilizada na fabricação do cimento (Supriya *et al.*, 2023). No Brasil, como visto na Tabela 1, existem 5 tipos de cimento que podem variar na composição de clínquer. A redução do fator clínquer é a medida mais eficaz na redução de emissão por tonelada de cimento produzido (Ammenberg *et al.*, 2015). A comparação das Environmental Product Declaration (EPD), documentação que mostra os impactos ambientais causados pelo produto através da análise do ciclo de vida (ACV), dos cimentos CPV ARI (Votorantim Cimentos, 2023) e CPIII 40 RS (Votorantim Cimentos, 2023), mostram que a adição de escória na faixa de 48 a 57% reduziu o impacto ambiental significativamente, saindo o potencial de aquecimento global (GWP-GHG) de 0,852 t CO₂eq no CPV ARI para 0,384 t CO₂eq. no CPIII 40 RS devido a redução do fator clínquer do cimento. A troca dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos se apresenta como uma excelente oportunidade de redução nas emissões de CO₂, pois a queima de combustíveis fósseis representa 40% das emissões de CO₂ do processo (Asamany; Gibson; Pegg, 2017). O relatório do Balanço Energético Nacional (2023a) mostrou que 44,7% da energia consumida no país provém de fontes renováveis, com alta participação da biomassa da cana, lenha/carvão vegetal com 16,4% e 8,7%.

Ammenberg *et al.* (2015) estudaram a ACV confirmando a redução das emissões de CO₂ eq/t de produto, tomando como base o clínquer e cimentos com diferentes adições de escória de alto forno (Figura 6).

Figura 6 - Redução nas emissões de CO₂ com incremento do % de adição de escória



Fonte: adaptado de Ammenberg *et al.* (2015).

Estudo de Mahasanan, Smith e Humphreys (2003) mostrou que 90% das emissões são oriundas da calcinação e queima de combustíveis, logo como a reação de calcinação é inerente ao processo, a alternativa neste caso é a redução do fator clínquer no cimento, ou seja, o uso de adições ao cimento para reduzir o consumo de clínquer na fabricação. As adições ao cimento, como pozolana ou escória de alto forno, são bastante eficazes conforme demonstrado na Figura 6, nas EPD's apresentadas e no estudo de Huntzinger e Eatmon (2009).

Existem estudos sobre adições alternativas, como o uso da fração fina de resíduos da construção civil, que mostrou potencial para utilização deste resíduo como uma adição ao cimento, pois além de reduzir o fator clínquer e, conseqüentemente, os efeitos associados a produção desta matéria-prima, ele também direciona o uso dos resíduos da construção civil, cuja geração está estimada em 3 bilhões de toneladas/ano no mundo (Oliveira; Dezen e Possan, 2020).

2.4.2 Coprocessamento

Como 40% das emissões estão associadas a queima de combustíveis fósseis, a utilização de combustíveis com menor potencial de emissão de CO₂ se apresenta como uma alternativa (Hasanbeigi; Price; Lin, 2012). Esse processo, de utilização de combustíveis alternativos, é

conhecido como coprocessamento. O licenciamento desta atividade é de responsabilidade do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da resolução nº 499 de 2020 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020). O estado de São Paulo possui uma norma P4.263 (2003) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) que dispõe sobre o tema. Esta norma técnica estabelece limites (Tabela 2) para as emissões que devem ser avaliadas em um teste de pré-queima deste combustível alternativo em um período máximo de 30 dias.

Tabela 2 - Limites superior de emissões gasosas - Norma técnica CETESB P4.263

Parâmetro	Limite de emissão (Valores na base seca)
Material particulado	70 mg/Nm ³ a 11% de O ₂
SOx	350 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
NOx	800 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Ácido Clorídrico	10,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Ácido Fluorídrico	4,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Cd + Tl	0,05 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Hg	0,04 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Pb	0,275 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
As + Co + Ni + Se + Te + Be	1,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Pb + As + Co + Ni + Se + Te + Be + Cr + Mn + Sb + Sn + Zn	5,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
THC (expresso como propano)	20 ppmv
Dioxinas e furanos	0,1 ηg/Nm ³ a 11% de O ₂

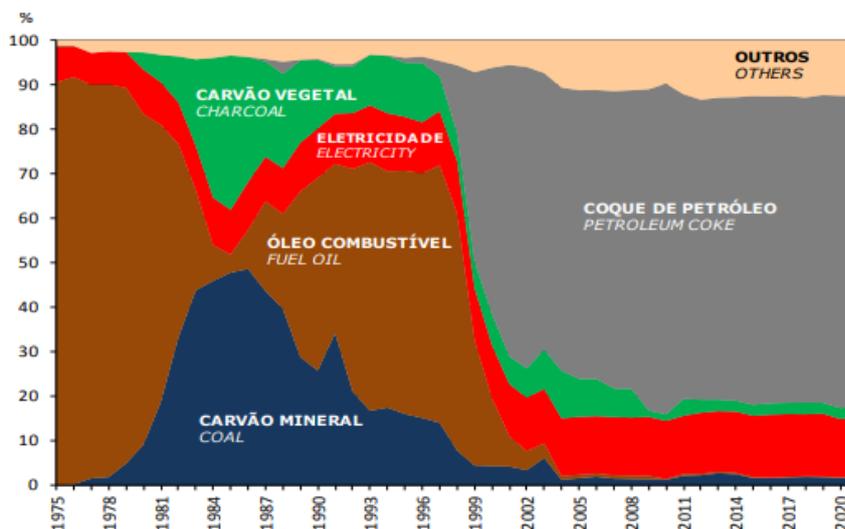
Fonte: CETESB P4.263 (2003).

2.4.3 Uso de combustíveis fósseis e AFR

Dentre os combustíveis fósseis utilizados pela indústria do cimento no mundo, o carvão com 67% e o coque de petróleo com 14% são os mais utilizados, sendo que nas fábricas modernas, aproximadamente 60% da energia é consumida no pré-aquecimento (pré-calcinador) e 40% no forno rotativo (Horsley; Emmert; Sakulich, 2016; “Preheater - IKN GmbH”, 2024). Estudo de Wojtacha-Rychter, Kucharsk e Smolinski (2021) chegou a valores inversos, sendo o consumo de 40% na torre de ciclones e 60% da energia no forno, entretanto, independentemente do local de consumo, esse combustível é consumido na etapa de transformação da farinha crua em clínquer.

No Brasil o coque de petróleo é o combustível mais utilizado (Figura 7), o relatório BEN (2023a) mostra que o coque representou 69,7% do consumo de energia em 2021.

Figura 7 - Principais combustíveis utilizados pela indústria do cimento no Brasil



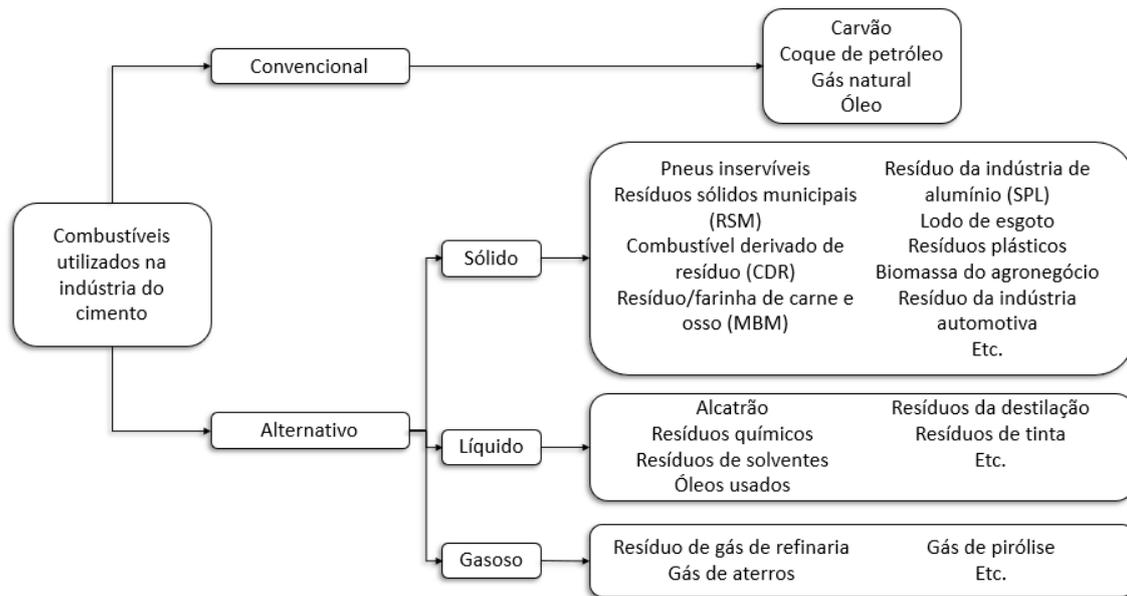
Fonte: Balanço Energético Nacional (2023a).

Estudo realizado pelo Roadmap Tecnológico do Cimento (2019) mostrou que de 1990 até 2014, a utilização de adições no cimento passou de 20 para 33% em média. Este mesmo estudo identificou que o uso de combustíveis alternativos aumentou, entre 2000 e 2014, de 9 para 15%, o que contribuiu para a diminuição das emissões de CO₂, NO_x e SO₂ e a diminuição no consumo de combustíveis provenientes de fontes não renováveis. Estas são as principais alavancas utilizadas pela indústria para reduzir o impacto ambiental da produção de cimento.

Na Europa, o uso de resíduos como AFR pode chegar a 80% da demanda. É esperado que o uso de combustíveis alternativos cresça para 37% (média global) em 2050, o que possibilitaria uma redução de 15% nas emissões de CO₂ (Scrivener; John; Gartner, 2018).

Existe uma grande variedade de AFR utilizados, podendo ser classificados em 3 grandes grupos conforme Figura 8. Estes combustíveis alternativos se diferem muito do tradicional (carvão e coque de petróleo), sendo necessária a análise físico-química detalhada antes de validar sua utilização.

Figura 8 - Tipos de combustíveis utilizados na indústria do cimento

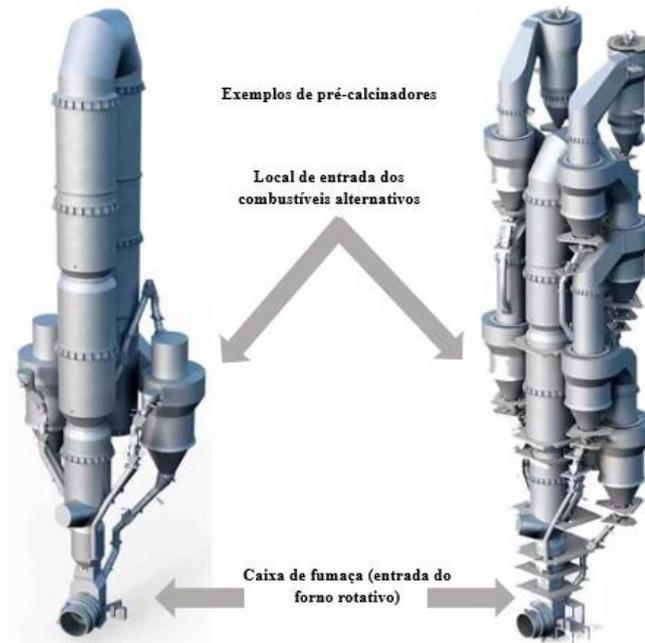


Fonte: adaptado de Rahman *et al.* (2017).

Algumas peculiaridades do processo produtivo e equipamentos utilizados na clínquerização, a saber: o tempo entre 6 a 10 segundos que o material fica submetido a altas temperaturas (em média 1450 °C), o ambiente alcalino (auxilia na neutralização dos gases ácidos formados), atmosfera oxidante (melhora o processo de queima), capacidade do clínquer em absorver os contaminantes inorgânicos do processo, área superficial elevada para as reações e mistura ideal de gases e produtos permitem que uma ampla gama de materiais possam ser utilizados como combustível alternativo (Moore, 1995 apud Kihara, 1999; Mantus, 1992; Rocha, Lins e Santo, 2011).

No coprocessamento o AFR é utilizado normalmente na torre de ciclones. Na torre existem diversas entradas onde podem ser abastecidas a chama, o local de entrada do combustível depende das suas propriedades, porém esta tecnologia foi o que permitiu o uso de combustíveis menos nobres no processo (Mantegazza, 2004). Na parte mais baixa, onde está a ligação entre a torre de ciclones e o forno rotativo, existe a caixa de fumaça, que é onde se depositam as cinzas oriundas da queima (FLSmith, 2023a). Essas cinzas se incorporam ao clínquer no processo de clínquerização (Mantegazza, 2004). A Figura 9 mostra alguns exemplos de torre de ciclones.

Figura 9 - Torre de ciclones



Fonte: adaptado de (FLSmith, 2023a).

Existem sistemas mais modernos que podem ter acoplados a torre de ciclones, exemplo: um forno rotativo chamado HotDisc (Figura 10). Neste forno materiais como pneus inservíveis inteiros e outros materiais maiores podem ser utilizados (FLSmith, 2023b). Uma característica deste tipo de equipamento é o melhor controle no tempo de permanência do combustível, por isso, a possibilidade de utilização de combustíveis em formatos maiores ou densificados.

Figura 10 - Exemplo de um HotDisc



Fonte: FLSmith (2023b).

2.4.3.1 Influência de elementos menores e traços à qualidade do clínquer

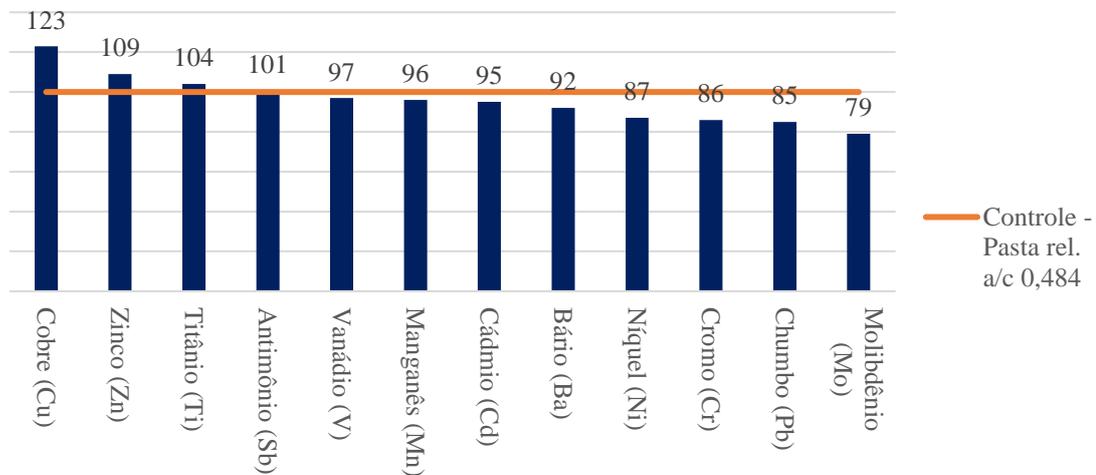
Diversos são os materiais utilizados, como mencionado na Figura 8, entretanto a utilização dos combustíveis alternativos deve ser analisada com criticidade, visto que, a maioria dos elementos são incorporados ao clínquer ou ao pó do forno e estes são fontes dos chamados elementos menores que, a depender da sua concentração, tem impacto significativo na qualidade do clínquer e no processo (Sprung, 1985 apud Mantegazza, 2004; Sprung, Kirchner, Rechenberg, 1984 apud Mantegazza, 2004; Seebach e Tompkins, 1991 apud Mantegazza, 2004).

Elementos menores são considerados os elementos com concentração abaixo de 1% em massa no clínquer e os traços são aqueles com concentração até 0,02% em massa e seu impacto estará associado à sua concentração (Cementequipment, 2023). Alguns deste elementos são voláteis a temperatura de trabalho do forno rotativo, por exemplo: S, K, Na, Zn, Cl, Pb, Cd, Tl e Hg. Eles se acumulam na fase gasosa e, depois se condensam nas regiões mais frias do sistema trazendo problemas a operação (Montini, 2009). Os que não são voláteis (Mg, Ti, P, Mn, Ba, Sr, Ni, Co, Cu e Cr) acabam sendo incorporados ao clínquer trazendo consequências ao cimento (Moir; Glasser, 1992).

Bhatty (2006) mostrou o impacto dos elementos menores na qualidade do cimento preparado com concentração de 0,50% de cada elemento. A comparação foi feita na pasta com uma relação água/cimento de 0,484 em comparação a pasta cimento base na mesma condição. Os gráficos apresentados nas Figuras 11, 12 e 13 mostram a necessidade de uma seleção criteriosa e o cuidado na utilização dos combustíveis alternativos frente ao possível impacto na qualidade do cimento, pois pequenas concentrações destes produtos impactam na reatividade e qualidade do clínquer, influenciando na formação das fases cristalinas, impactando nas resistências, desde as idades iniciais até a 28 dias, na formação de CaO livre e reologia do cimento (Bhatty, 2006; cementequipment, 2023).

Através do gráfico nota-se que os elementos berílio, cobre, zinco e titânio reduziram significativamente a reatividade do cimento, o que pode ser observado através do aumento do tempo de início de pega (Figura 11). No caso do berílio o impacto foi tão significativo que o início de pega foi excluído do gráfico e não foi possível medir a resistência da pasta (Figura 12). Os demais elementos tiveram efeito inverso, reduzindo o tempo de início de pega.

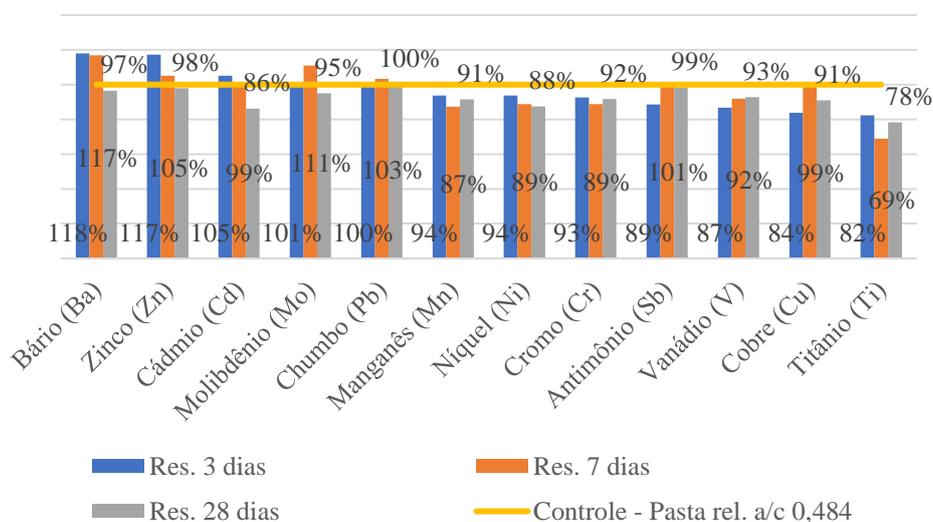
Figura 11 - Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, no tempo de início de pega da argamassa de cimento



Fonte: adaptado de Bhatta (2006).

Com relação as resistências à compressão, com exceção ao chumbo que não influenciou a resistência em nenhuma das 3 idades analisadas, todos os outros elementos tiveram impactos negativos na resistência à 28 dias (Figura 12). Estudos mais recentes também mostraram os efeitos negativos na resistência e na reatividade do cimento devido a presença de elementos como Ti, Cu, Zn, P entre outros (Blotevogel *et al.*, 2021; SOGA *et al.*, 2017). Os elementos bário, zinco, cádmio e molibdênio melhoraram os resultados das resistências em 3 dias e 7 dias.

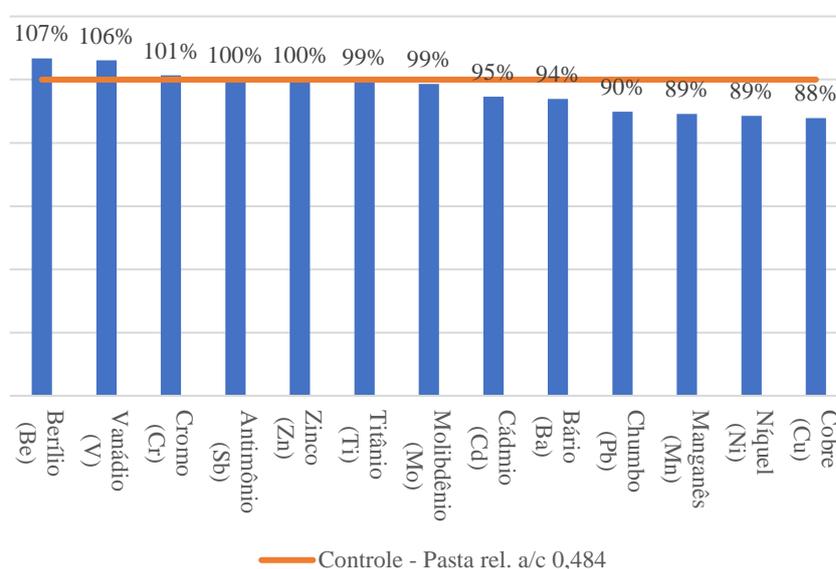
Figura 12 - Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, na resistência à compressão da argamassa do cimento



Fonte: adaptado de Bhatta (2006).

A análise dos resultados do estudo de Bhatti (2006) sobre o impacto dos elementos na reologia da pasta de cimento, indicou que o berílio e o vanádio melhoraram a fluidez. Cromo, antimônio, zinco, titânio e molibdênio não impactaram neste quesito a pasta. Os demais elementos prejudicaram a fluidez da pasta (Figura 13). Os estudos de Gineys, Aquad e Damidot (2010, 2011) não identificaram prejuízo na resistência aos 28 dias da argamassa na concentração analisada, porém alguns elementos trouxeram prejuízo a hidratação e, conseqüentemente, nas resistências a idades inferiores a 28 dias.

Figura 13 – Influência dos elementos menores, na concentração de 0,50%, na fluidez da argamassa de cimento após 5 minutos da mistura



Fonte: adaptado de Bhatti (2006).

2.5 VIABILIDADE TÉCNICA E POTENCIAL DE REDUÇÃO NOS CUSTOS DO COMBUSTÍVEL COM O USO DO COPROCESSAMENTO

O coprocessamento é uma alternativa para redução do consumo de combustível de origem fóssil. Lamas, Palau e Camargo (2013) estimaram uma redução anual de 1,4 milhão de dólares considerando uma substituição de 15% do coque de petróleo por combustível alternativo. Hemidat *et al.* (2019) estimaram que na queima de cada 1 kg de coque de petróleo, 0,7 kg (70%) é emitido como CO₂.

A simples troca do combustível tradicional pelo alternativo não é certeza de sucesso, afinal existem desvantagens associadas a esta troca que devem ser avaliadas e controladas pela indústria do cimento. Outro ponto é que o poder calorífico dos AFR tende a ser menor que o apresentado pelo coque. Para sua utilização na indústria cimenteira como combustível o poder

calorífico inferior (PCI) deve ser maior que 2700 a 3000 kcal/kg ou em caso de mistura de combustíveis o PCI não pode ser inferior a 1700 kcal/kg por combustível utilizado (Kusuma *et al.*, 2022; Madlool *et al.*, 2011; Sellitto *et al.*, 2013). Além do requisito mínimo de PCI, o uso de combustíveis alternativos irá depender do estado físico (sólido, líquido ou gasoso), composição química (atenção ao conteúdo de cloro < 0,2%; enxofre < 2,5%), toxicidade (atenção aos metais pesados que serão incorporados ao clínquer como elementos menores ou traços), leis ambientais do país, teor de umidade, teor de cinzas, propriedades físicas como tamanho, densidade aparente, massa específica, homogeneidade (Madlool *et al.*, 2011; Mokrzycki e Uliasz-Bocheńczyk, 2003). Os cuidados necessários na validação de um AFR mostram a importância dos estudos sobre o tema. Independentemente de todos os ensaios acima citados e mesmo que aprovado tecnicamente o material, para sua utilização é necessário um abastecimento constante e em quantidade suficiente para atender a demanda da indústria do cimento. Um exemplo da quantidade necessário é que um forno de clínquerização com capacidade de 1000 t/dia pode consumir até 5000 pneus/dia (Battagin; Cardoso, 2018).

Adaptações da indústria tanto nas instalações físicas como nos equipamentos de queima se fazem necessárias. Problemas no processo podem acontecer, por exemplo: acúmulos e bloqueios de tubulação, aumento nas emissões de SO₂, NO_x e CO, alteração na geração de pó no forno (conhecido como *cement kiln dust* – CKD) são pontos que devem ser controlados (Chinyama, 2011; Rahman *et al.*, 2015).

O tamanho das partículas do combustível alternativo influencia no seu comportamento e pode fazer com que este AFR não queime por completo e entre dentro do forno rotativo de clínquer e, neste caso, a queima deste material residual em contato com a matéria prima do cimento pode aumentar a circulação de materiais voláteis como, por exemplo, o enxofre o que pode causar entupimentos e corrosão de equipamentos gerando perdas no processo produtivo, além de afetar a qualidade do clínquer produzido (Cortada Mut, Nørskov, Glarborg, *et al.*, 2015).

2.6 UMA VISÃO GERAL DOS AFR UTILIZADOS E SUA EFICIÊNCIA DE SUBSTITUIÇÃO

Dentro os tipos de AFR utilizados têm-se: resíduos da indústria siderúrgica (óleos e emulsões, graxas, escória etc), resíduos da indústria do alumínio (*spent pot lining* – SPL), resíduos da indústria automobilística e derivados (tintas, solventes, pneus inservíveis, plásticos industriais, mantas etc), resíduos municipais – comerciais e domésticos – e seus derivados (resíduo sólido municipal - RSM, combustível derivado de resíduo - CDR, plásticos, papel,

lodo de esgoto etc), resíduos da indústria de papel e celulose (lixívia), resíduos do agronegócio (cascas de arroz, caroço de açaí, palha e bagaço de cana-de-açúcar, casca do café etc) e outras biomassas (lascas e serragem de madeira, *meat and bone meal* - MBM) (Associação Brasileira de cimento Portland, 2022; Battagin; Cardoso, 2018; Coprocessamento, 2022; Torres; Lange, 2022).

Além do PCI, duas outras características são fundamentais para verificar a viabilidade. Uma é o teor de carbono fixo (TCf), utilizada para calcular o fator de emissão de carbono, e a outra é a umidade. Tais características influenciam diretamente no nível de emissão de CO₂, no seu poder calorífico e podem inviabilizar sua utilização (Murray e Price, 2008; Sellitto *et al.*, 2013).

A Tabela 3 mostra a análise imediata com materiais voláteis (Mv), TCf e teor de cinzas (Tc) e o PCI de alguns dos principais combustíveis alternativos utilizados em comparação com o coque de petróleo.

Tabela 3 - Propriedades de alguns dos combustíveis alternativos utilizados

Combustível Alternativo	Análise imediata			PCI * (kcal/kg)	Referência
	Mv	TCf	Tc		
Coque de petróleo	9,0-13,0	71,0-95,0	0,2-3,0	7050,5-8126,0	[1 - 4]
Madeira de pinho	79,0-83,0	15,0-17,0	0,3-0,5	4708,3-4732,2	[5, 6]
Palha	64,3-80,5	13,0-19,5	4,7-20,1	4325,9	[7, 8]
Casca de arroz	61,0-69,0	16,0-17,0	15,0-20,0	3680,6	[9, 10]
CDR	60,0-84,0	2,0-16,0	8,0-32,0	3346	[11, 12]
Pneus Inservíveis	54,0-66,0	23,0-30,0	7,0-23,0	7409-7839,2	[13, 14]

Onde:

* PCI calculado com base no Poder calorífico superior (PCS)

[1 - 4] - (American Fuel & Petrochemical Manufacturers - AFPM, 2012; Milenkova *et al.*, 2003; Singer, 1993; U.S. Department of Energy, 2012)

[5, 6] - (Hassan, Steele e Ingram, 2009; IEA Bioenergy, 2013)

[7, 8] - (Stenseng, 2001; Vassilev *et al.*, 2010)

[9, 10] - (IEA Bioenergy, 2013; Tsubouchi *et al.*, 2005)

[11, 12] - (Kobyashi *et al.*, 2005; Tokheim, 1999)

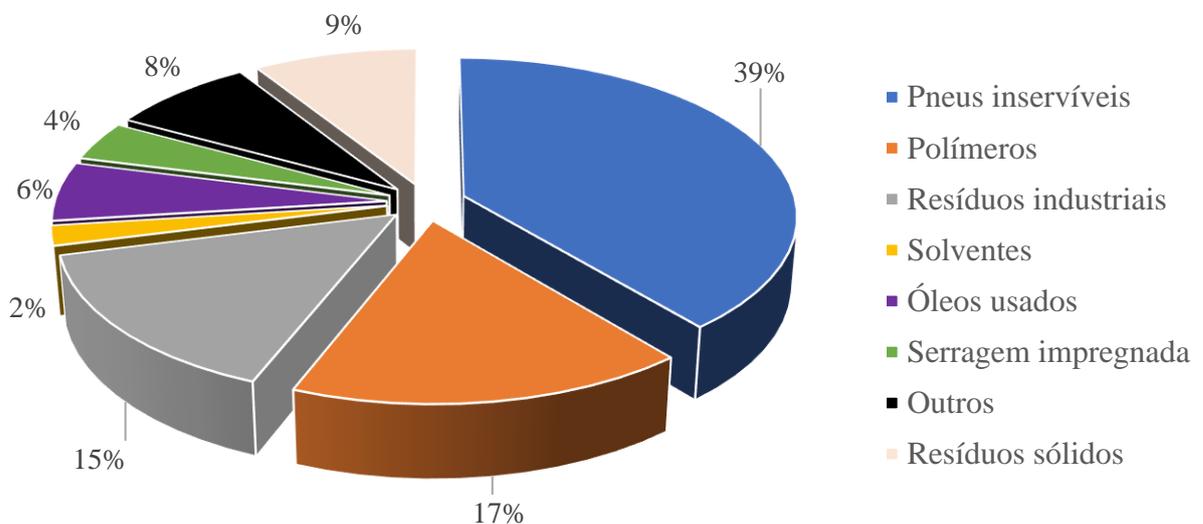
[13, 14] - (Chinyama e Lockwood, 2007; Larsen, 2007)

Fonte: adaptado de (Cortada Mut, Nørskov, Frandsen, *et al.*, 2015).

Pela Tabela 3 o pneu inservível é um combustível alternativo com PCI similar ao coque de petróleo. Esta característica conjuntamente à disponibilidade de material e seus impactos na qualidade do clínquer, justifica que 39% dos materiais coprocessados na indústria brasileira

sejam oriundos desta fonte (Figura 14). Em 2014, um total de 1,12 milhões de toneladas de resíduos foram coprocessados sendo a distribuição indicada na Figura 14 (Lagarinhos *et al.*, 2016).

Figura 14 - Percentual dos combustíveis alternativos utilizados no Brasil



Fonte: adaptado de Lagarinhos *et al.* (2016).

2.6.1 Pneus inservíveis

O uso de pneus inservíveis como fonte de combustível alternativo se mostra como a mais viável das alternativas de destinação deste resíduo, visto que eles possuem um alto PCI e as características do forno de clínquer acabam por consumi-los completamente (Lamas, Palau e Camargo, 2013). No Brasil 57% dos pneus descartados tem como destino as fábricas de cimento (Lamas; Palau; Camargo, 2013).

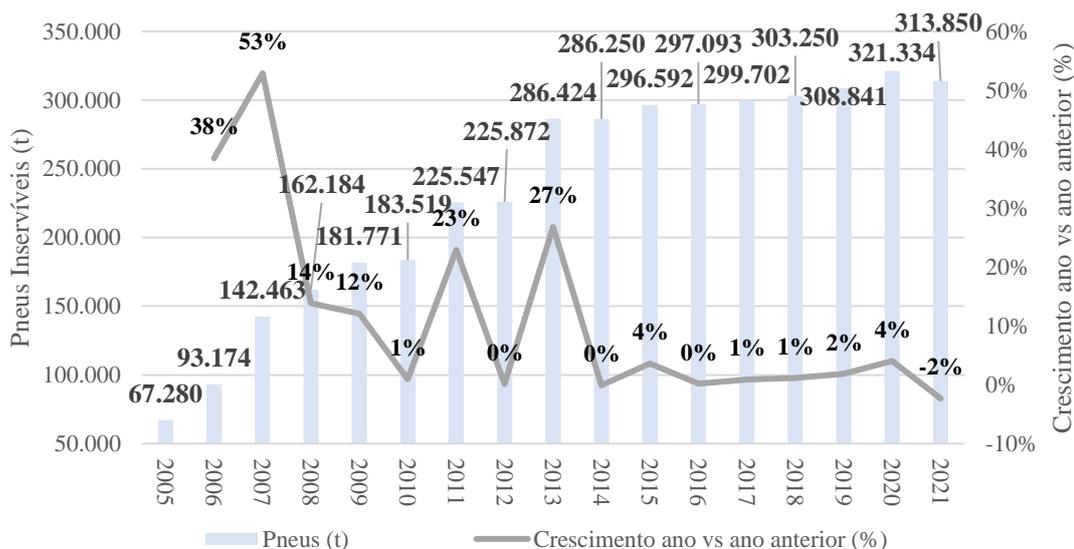
Pneus inservíveis, que podem ser inteiros ou picados, são amplamente utilizados, pois além do alto poder calorífico há a redução de emissões de CO₂, pois possui um TCF menor quando comparado com o coque e PCI similar (Tabela 3).

Estudos realizados por Puertas e Blanco-Varela (2004) mostraram que o clínquer e o cimento produzidos com o uso de pneus no coprocessamento não apresentaram diferença de

qualidade frente ao produto produzido com o combustível fóssil, o que confirma o potencial deste tipo de material.

Conforme a Figura 14, o uso de pneus inservíveis representou quase 40% do total dos combustíveis alternativos utilizados no Brasil em 2014. De 2005 para 2021 o total, em toneladas, utilizados no coprocessamento aumentou 366%, conforme Figura 15. Essa evolução acompanha também o aumento da atividade de coprocessamento que saiu do patamar de 400 mil toneladas em 2005 para 2,4 milhões de toneladas em 2021, um aumento de 500% (Coprocessamento, 2022). Isso pode ser explicado pela regulamentação desta atividade no início dos anos 2000 com publicações da CETESB P4.263 (2003) e CONAMA n° 264 (2000), sendo esta última revogada e substituída pela norma CONAMA n° 499 (2020) posteriormente.

Figura 15 - Evolução na utilização de pneus inservíveis na indústria cimenteira no Brasil



Fonte: adaptado de “Panorama do Coprocessamento - Brasil 2022 (Ano base 2021) - Coprocessamento” (2022).

O uso de pneus inservíveis pode reduzir as emissões de CO₂ e NO_x e sua ampla disponibilidade o colocam como umas das melhores alternativas na atualidade, entretanto, seu uso fica limitado a, no máximo, 30% de substituição (Rahman *et al.*, 2017). Essa limitação ocorre devido à presença de metais pesados na composição, principalmente zinco que afeta as resistências iniciais e finais do cimento (Lamas; Palau; Camargo, 2013).

2.6.2 Resíduos sólidos municipais e Combustível derivado de resíduo

Os resíduos sólidos municipais (RSM) destinados de maneira legal a aterros representam 11,35 milhões de toneladas/ano, sendo considerado um potencial AFR, entretanto algumas características como heterogeneidade elevada, ser biodegradável, apresentar umidade elevada acabam dificultando sua utilização (Torres; Lange, 2022). Os resíduos sólidos municipais, podem ser submetidos a um processo de seleção para melhor homogeneidade, melhoria das propriedades físico-químicas, melhoria da logística de transporte e, em alguns casos peletização, ficando conhecidos como combustível derivado de resíduo - CDR (Rahman *et al.*, 2015). A própria resolução CONAMA n° 499 (2020) no seu artigo 1 parágrafo 2 limita o uso deste material desde que previamente submetido a um processo de triagem, classificação e tratamento.

A seleção do RSM se mostra interessante, pois a retirada de materiais orgânicos diminui consideravelmente a umidade do material o que melhora em 41% o seu PCI e, se a triagem retirar também os materiais inertes, a melhora atinge 56%, sempre em comparação ao produto “in natura” (Torres; Lange, 2022). Estudo de Rahman *et al.* (2015) alcançaram melhora em 40% o poder calorífico do material após transformação do RSM em CDR. A simulação do uso deste combustível, substituindo 30% do combustível fóssil, reduziu a emissão de CO₂ em 4,7% (Rahman *et al.*, 2017).

Hashem, Razek e Mashout (2019) estudaram o uso de CDR na Europa e devido a melhor organização e homogeneidade do material, o uso de CDR como combustível na produção de cimento pôde alcançar valores superiores a 70%. O uso de CDR reduz os níveis de emissões de gases do efeito estufa (GHG) em até 25% e SO₂ devido ao baixo teor de enxofre quando comparado com os combustíveis fósseis tradicionais (carvão e coque de petróleo) (Gerassimidou *et al.*, 2021; Saveyn *et al.*, 2016).

Este é um mercado com uma alta oferta, estimasse um potencial de 50 milhões de toneladas por ano de CDR e, deste total, apenas 13,5 milhões de toneladas são utilizadas como fonte energética alternativa (Gerassimidou *et al.*, 2021).

Hemidat *et al.* (2019) consideraram a viabilidade econômica com taxas de substituição em até 30%, analisando tanto a redução de consumo de coque de petróleo como a economia atrelada a uma redução nas emissões de CO₂. Tal estudo mostrou que o poder calorífico do resíduo aumentou em 58% após o tratamento, chegando a 3724 kcal/kg e a quantidade de material destinado a aterros diminuiu em 35%. Em termos econômicos, após ser descontado os custos para o tratamento do resíduo e transformação em CDR, uma redução de aproximadamente US\$ 1,7 milhões seria alcançada com uma taxa de substituição de 5%

podendo chegar a US\$ 4,46 milhões com 30% de substituição. Utilizando a taxa de substituição de 15%, devido a possíveis efeitos adversos na qualidade do clínquer, as economias alcançariam a cifra de US\$ 2,64 milhões. Todos estes valores anualizados e considerando uma produção diária de 4.000 toneladas de clínquer (Hemidat *et al.*, 2019).

A presença de cloro afeta diretamente o processo devido à sua volatilidade, causando problemas como entupimento e corrosão dos materiais na torre de ciclones, além de atuar como um catalisador aumentando a volatilidade dos metais pesados e afetando a qualidade do clínquer (Murray; Price, 2008). Estudo de Gerassimidou *et al.* (2021) mostraram que o cloro acaba sendo absorvido pelo clínquer durante o processo, interferindo na formação da fase alita. O nível de contaminação por cloro depende das instalações da fábrica, com valores usuais entre 0,5% à 2,0% em peso do material, mas o ideal é trabalhar com valores até 1% em peso (Gerassimidou *et al.*, 2021). A análise da composição de um CDR mostra que os polímeros podem variar entre 10 a 17% do total, sendo este uma das fontes de cloro no CDR, o que reforça a necessidade de controle e tratamento deste resíduo antes da sua utilização (Torres; Lange, 2022).

2.6.3 Biomassa

A biomassa já se encontra na quarta posição entre as fontes de energia e é responsável por 14% da energia consumida globalmente (Biswas; Sharma, 2021).

No Brasil o uso de biomassa, principalmente a oriunda do agronegócio, se mostra um ramo bastante promissor. Estudo de Mendoza Martinez *et al.* (2019) estima que mais de 200 milhões de toneladas de resíduos oriundos da agroindústria não são utilizados como fonte energética devido à propriedades como: baixa densidade aparente, baixo poder calorífico e alta umidade. Quando analisamos estas propriedades, conclui-se que uma grande dificuldade da utilização deste tipo de combustível está relacionada ao transporte, visto que a sua baixa densidade aparente eleva os custos atrelados ao processo inviabilizando a utilização (García *et al.*, 2017). Uma alternativa seria o processamento deste resíduo e sua transformação em briquetes, o que melhora a densidade do produto, sua homogeneidade e densidade energética (Chinyama, 2011; Mendoza Martinez *et al.*, 2019). Briquetes são normalmente produzidos de resíduos de biomassa, podendo ser utilizado uma única fonte ou uma mistura de materiais. Estes resíduos são tratados, misturados a um aglutinante e extrusados formando uma peça cilíndrica de resíduo compactado (Mendoza Martinez *et al.*, 2019).

A Votorantim Cimentos, por exemplo, utiliza diversas fontes de biomassa como combustível alternativo, por exemplo: bagaço de cana de açúcar e babaçu, cavaco de madeira, casca de arroz, caroço de açaí e de azeitona (Estado de São Paulo, 2023; O Eco, 2023; Verdera

Solutions, 2023; Votorantim Cimentos, 2023c; d). Todos os materiais mencionados acima já foram testados e aprovados industrialmente, tanto com relação a qualidade como fonte de energia como em relação aos impactos na qualidade do produto.

Resíduos de biomassa normalmente são utilizados como um combustível secundário e durante fase de pré-aquecimento da farinha na torre de ciclones (Murray e Price, 2008). A queima conjunta de biomassa e carvão reduz os custos relativos ao combustível, tornando economicamente viável o processo além de reduzir as emissões de NO_x e SO₂ (Demirbaş, 2003; Murray e Price, 2008).

A Tabela 4 exemplifica algumas das biomassas utilizadas hoje no processo de fabricação do clínquer e o potencial de emissões de CO₂/t de biomassa.

Tabela 4 - Dados de biomassa utilizadas na indústria cimenteira

Combustível alternativo	PCI * (kcal/kg)	Umidade (%)	Fator de emissão de carbono (t C/t)	Emissão de CO₂ (t CO ₂ /t biomassa)	Ref
Casca de arroz	3155-3872	10	0,35	1,28	[1-3]
Palha de trigo	3776-4350	7,3-14,2	0,42	1,54	[4-6]
Palha de milho	2199-3681	9,4-35	0,28	1,03	[7-9]
Folhas de cana de açúcar	3776	<15	0,34	1,25	[10]
Bagaço de cana de açúcar	3442-4637	10,0-15,0	0,39	1,43	[11, 12]
Hastes de canola	3920	12,6	0,39	1,43	-
Cascas de avelã	4182	9,2	0,48	1,76	[13]
Resíduos de madeira	3704,5-4158,6	33,3	0,34	1,25	[14, 15]
Serragem	3843,5	20	0,38	1,39	[16, 17]

PCI: calculado com base no PCS

[1-3] - (Demirbaş, 2003; Jenkins *et al.*, 1998; Mansaray e Ghaly, 1997)

[4-6] - (Demirbaş, 2003; Jenkins *et al.*, 1998; McIlveen-Wright *et al.*, 2007)

[7-9] - (Asian Development Bank, 2006; Demirbaş, 2003; Mani, Tabil e Sokhansanj, 2004)

[10] - (Jorapur e Rajvanshi, 1997)

[11, 12] - (Asian Development Bank, 2006; Jingjing *et al.*, 2001)

[13] - (Demirbaş, 2003)

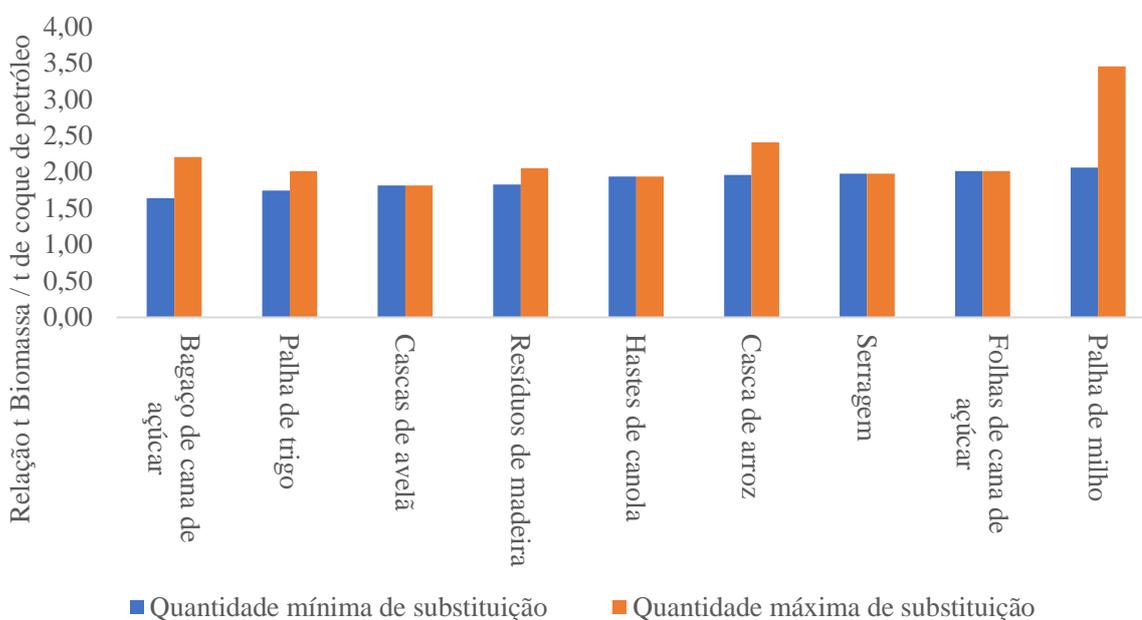
[14, 15] - (Jingjing *et al.*, 2001; McIlveen-Wright *et al.*, 2007)

[16, 17] - (Demirbaş, 2003; Resource Management Branch, 1996)

Fonte: adaptado de Murray e Price (2008).

Segundo Murray e Price (2008), a utilização de valores superiores a 20% de substituição torna o processo de fabricação instável, pois a biomassa é um AFR bastante heterogêneo e dificulta o controle da chama. A quantidade de coque que pode ser substituída por biomassa dependerá da uniformidade do material, do PCI da amostra, do teor de umidade assim como da qualidade do combustível fóssil utilizado. A Figura 16 indica a quantidade em toneladas de biomassa, independente da origem, necessária para substituir 1 tonelada de coque. Com base em valores mínimos e máximos do PCI, a substituição aproximada será de 1,6-3,4 t de biomassa para cada tonelada de coque (Murray e Price, 2008).

Figura 16 - Taxas de substituição de coque de acordo com o tipo de biomassa



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 4 foi considerada as emissões de CO₂/t de biomassa, ou seja, o AFR não foi considerado carbono neutro. Esse é um tema controverso, pois alguns autores consideram a biomassa um combustível carbono neutro, visto que durante a sua fase de crescimento ela consome o CO₂ que será liberado na combustão (Canaveira, 2015; Demirbaş, 2003). Dentre as discordâncias existe o lapso temporal, pois a emissão é um processo rápido enquanto a captura é um processo lento e, só poderia ser considerado carbono neutro, se o processo todo fosse em ciclo fechado; além disso todo o manejo desde o plantio até o corte/colheita e queima são emissores de CO₂ (Canaveira, 2015).

Dentre as dificuldades já citadas de custo relativos a logística e a heterogeneidade do produto, temos que algumas biomassas podem ter presença de cloro elevada, que por ser volátil, acaba se concentrando em zonas mais frias do sistema causando problemas de corrosão devendo, portanto, ser controlada (Matsuda *et al.*, 2005; Meystre, 2016). A queima conjunta parece uma alternativa viável para controle da chama e redução da concentração de cloro no sistema (Biswas e Sharma, 2021; Demirbaş, 2003).

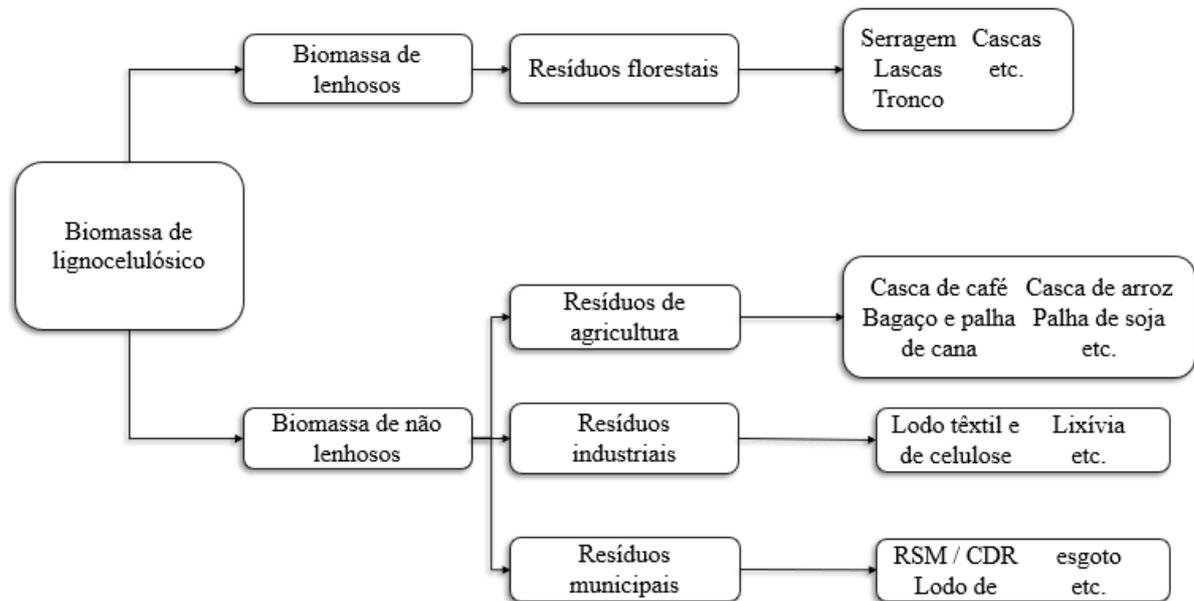
O relatório do Panorama do Coprocessamento apresentado por Coprocessamento (2024) indica que em 2022 do total de combustível utilizado, 16% eram oriundos de biomassa e deste percentual 17% tiveram como fonte material agrícola. Este valor indica um total de 283 mil toneladas de biomassas agrícolas processadas, portanto biomassas lignocelulósicas são fontes de energia testadas em operação, indicando seu potencial. O potencial para que não ocorram problemas de entupimento, incrustações e deposições podem estar associados as características do forno de cimento como tempo de permanência elevado a altas temperaturas, atmosfera oxidante e alcalinidade. (Moore, 1995 apud Kihara, 1999; Mantus, 1992; Rocha, Lins e Santo, 2011).

2.6.3.1 Resíduo do processamento do café

Segundo Mendoza Martinez *et al.* (2019) a cadeia produtiva do café é uma importante fonte de biomassa sendo estimada em mais de 10 milhões de toneladas de resíduos por ano e, considerando apenas o Brasil, estima-se em 2,3 milhões de toneladas/ano de resíduos sólidos. Os maiores produtores nacionais são os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo respectivamente (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023b).

Esta biomassa pertence ao grupo de biomassas lignocelulósicas, que incluem outros materiais como: resíduos florestais, industriais e municipais (Kaur, Kaur e Kaur, 2024). A Figura 17 exemplifica os 2 grandes grupos e suas subdivisões.

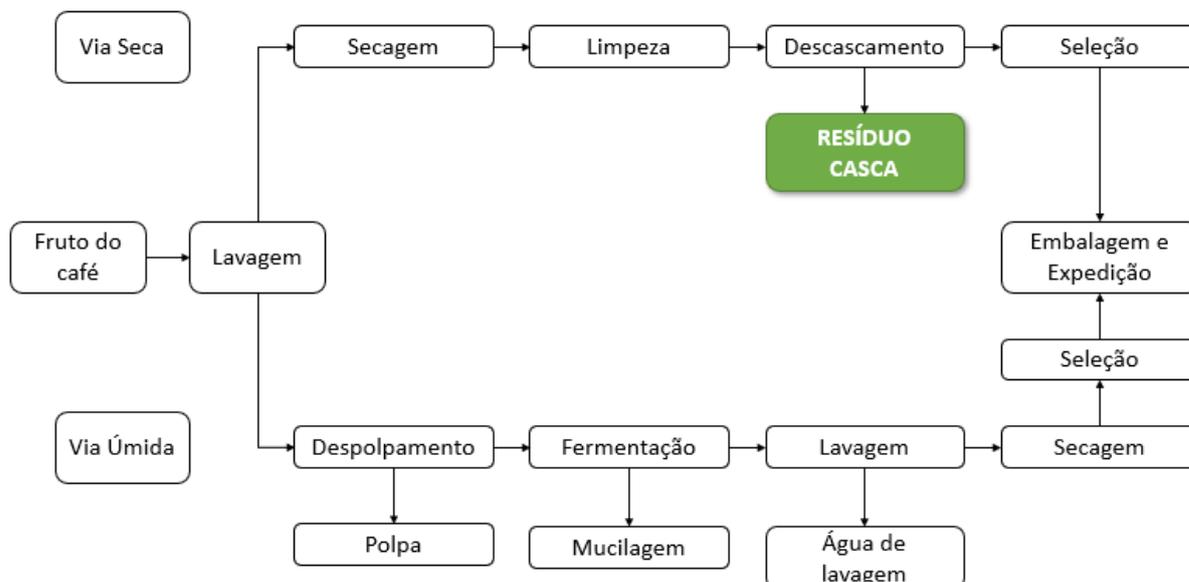
Figura 17 - Biomassas lignocelulósicas



Fonte: adaptado de Borges, Sellin e Medeiros (2008); Carvalho, Vidal e Barros da Hora (2011); Kaur, Kaur, Kaur (2024).

Soccol (2002) estimou a produção de resíduo de casca em 30 milhões de sacas, o que representa algo como 1,8 milhões de toneladas. A casca é oriunda do processo de beneficiamento por via seca (Figura 18) que representa 80% do beneficiamento de todo café produzido no Brasil (Soccol, 2002). A composição da casca do café (resíduo proveniente do processo a seco) ou da polpa do café (resíduo proveniente do processo a úmido) contém cafeína e taninos que acabam limitando as opções de uso deste produto devido à toxicidade (Pandey *et al.*, 2000). Uma opção seria a utilização da casca de café como fonte de energia térmica (Vale *et al.*, 2007).

Figura 18 - Representação do processo de beneficiamento do fruto do café



Fonte: adaptado de A. A. Durán *et al.* (2017) e Soccol (2002).

Pasquali *et al.* (2013) mostraram a viabilidade da utilização de casca de café em aciarias elétricas. Neste estudo compararam as suas propriedades com a casca de arroz, um material já utilizado e que apresenta PCI inferior ao da casca do café. Mendoza Martinez *et al.* (2019) utilizaram briquetes produzidos dos resíduos do cultivo do café misturados com resíduos da produção de madeira de pinho, em diferentes proporções, resultando em uma fonte eficiente de combustível alternativo.

A análise química (Tabela 5) da casca de café mostram os elementos com maior concentração antes da queima (Hoseini *et al.*, 2021). Já a Tabela 6 mostrou a análise química realizada nas cinzas resultante da queima. Os valores obtidos sugerem o potencial técnico do produto, pois quando comparamos com o estudo de Bhatti (2006) temos que os elementos de maior concentração na cinza não são os listados como os mais críticos para a qualidade do cimento produzido.

Tabela 5 - Análise química da casca de café

(continua)

Elemento	Quantidade - base seca (mg/kg)
Inorgânicos	5.000 - 30.000
Potássio (K)	20.600
Cálcio (Ca)	2.210
Nitrogênio (N)	1.720 - 1.830
Enxofre (S)	1100

(conclusão)

Elemento	Quantidade - base seca (mg/kg)
Magnésio (Mg)	790
Ferro (Fe)	260
Boro (B)	91,4
Fósforo (P)	80
Manganês (Mn)	60
Sódio (Na)	40
Cobre (Cu)	20
Zinco (Zn)	10
Selênio (Se)	0,19

Fonte: adaptado de Hoseini *et al.* (2021).

A Tabela 6 exemplifica a composição química das cinzas oriundas da queima da casca de café em diferentes temperaturas de queima.

Tabela 6 - Análise química da cinza resultante da queima da casca de café

Composição química das cinzas da casca de café e outros combustíveis										
Combustível	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Casca de café ²	13,5	2,2	NM ¹	3,7	3,9	10,7	4,0	NM ¹	0,4	38,1
Casca de café ³	0,63	0,46	NM ¹	NM ¹	0,45	8,55	2,52	1,20	0,11	53,51
Casca de café ⁴	0,56	0,42	NM ¹	NM ¹	0,43	4,54	5,49	2,75	0,09	68,87

Onde:

1. valor não medido (NM)
2. valor obtido após queima à 500°C
3. valor obtido após queima à 600°C
4. valor obtido após queima à 700°C

Fonte: adaptado de Saenger *et al.* (2001) e Lima, Gomes e Moraes (2022).

Verifica-se um teor elevado de óxido de potássio na análise da composição das cinzas e dos elementos constituintes da casca de café, o que parece ser uma característica comum de biomassas oriundas de resíduo da agricultura como bagaço de cana, palha de trigo ou casca de amêndoa, já que este é um nutriente essencial para o crescimento da planta (Clery *et al.*, 2018; José Carvalho, 2011; Luis Franco Jacome, 2014). Estudo de Lima, Gomes e Moraes (2022) mostraram que as cinzas se fundiram na queima a 800°C não sendo possível a sua análise. O potássio age como fundente e atua na queda no ponto de fusão da cinza o que pode levar a problemas de entupimento e corrosão no sistema (Clery *et al.*, 2018; Saenger *et al.*, 2001).

Uma das preocupações encontradas por Saenger *et al.* (2001) foram as emissões de NO_x e N₂O que ficaram em 450-525 mg/m³ e 3-27 mg/m³ respectivamente. Este valor, apesar de

elevado, é menor que a emissão de carvão betuminoso por exemplo e, está dentro dos limites estabelecidos em norma técnica da CETESB sobre coprocessamento, não sendo um fator limitante para a utilização da biomassa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Dentre as diversas espécies de café existentes, a espécie *Coffea arabica* L. e a espécie *Coffea canéfora* respondem por toda a produção global, sendo 75% do tipo arábica (Hermosa, 2014). A casca do café, objeto deste estudo, foi obtida no estado de Minas Gerais, nas cidades de Três Pontas e São Gonçalo do Sapucaí. A casca do café analisada é do tipo *Coffea arabica* L. e foi gerada através do processamento via seca. A Figura 19 exemplifica o material objeto deste estudo.

Figura 19 - Amostra da casca de café



Fonte: Autoria própria.

A amostra possuía aproximadamente 20 kg de casca que após a coleta foi, dividida em 2 amostras de 10 kg cada, armazenadas em embalagens plásticas, lacradas e levadas a universidade e ao laboratório da Votorantim Cimentos para as análises. Os materiais foram ensaiados em dois períodos distintos. A primeira etapa de testes ocorreu durante o primeiro

semestre de 2022 e a segunda etapa de testes durante o segundo semestre de 2023 e início de 2024.

3.1 ENSAIO DE UMIDADE NA BASE SECA E NA BASE ÚMIDA

O ensaio de umidade foi realizado em duplicata para cada amostra. Para o ensaio, as amostras foram primeiramente colocadas em uma caixa plástica e homogeneizadas (Figura 20).

Figura 20 - Homogeneização da casca de café



Fonte: Autoria própria.

Após a homogeneização, foi feito o quartejamento e coleta das amostras. A coleta da amostra foi feita em cruz (conforme indicado na Figura 21) até se obter a massa para análise. As cascas foram secas em uma estufa Quimis modelo Q317M-12 seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 14929 (2017), porém na temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

Figura 21 - Quartejamento da amostra de café e modelo de coleta.



Fonte: Autoria própria.

O cadinho de secagem, antes de sua utilização passou por um processo de limpeza e secagem à $105\pm 2^{\circ}\text{C}$. A massa utilizada no ensaio foi de 250g. Foi utilizada uma balança de precisão da marca Ohaus. A amostra foi considerada seca, após passar pelo menos 24h na estufa e sua massa seca se estabilizar em duas pesagens consecutivas com 2h de intervalo entre as pesagens.

Para o cálculo da umidade base seca foi utilizada a Equação 1:

$$Ubs \% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Ubs = umidade base seca (%);

m_u = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g).

Para o cálculo da umidade base úmida foi utilizada a Equação 2:

$$Ubu \% = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Ubu = umidade base úmida (%);

m_u = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g).

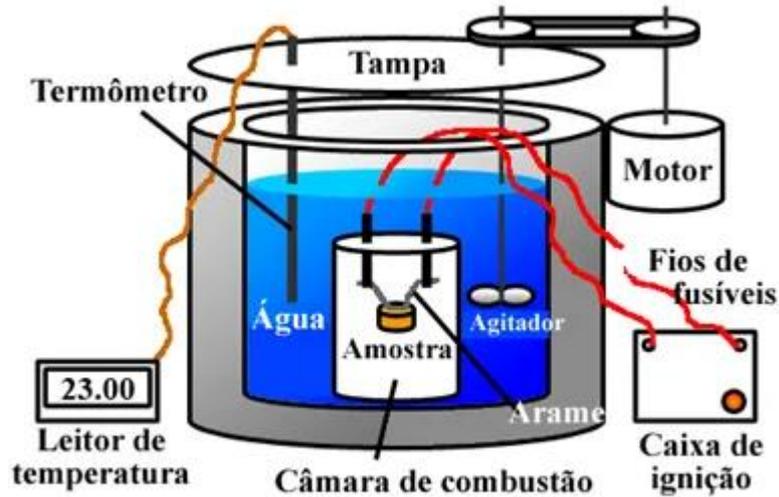
3.2 ENSAIO DE PODER CALORÍFICO – PCS, PCI E PCU

Para o ensaio de PCS a amostra foi quarteada e moída em um moinho do tipo Willye modelo TE-680. O material moído foi seco seguindo os mesmos procedimentos apresentados no ensaio de umidade e foi pesado 1g de material.

O material foi colocado em um cadinho que foi colocado dentro da bomba calorimétrica. Foi feita a combustão completa do material, restando somente as cinzas. O equipamento registra a diferença de temperatura da água contido no vaso calorimétrico e calcula o PCS da amostra. Foram realizados 2 ensaios.

A Figura 22 mostra o modelo esquemático do equipamento de calorimetria.

Figura 22 - Diagrama de funcionamento do equipamento de calorimetria



Fonte: “O que é um calorímetro? Funcionamento de um calorímetro” (2023).

Calculou-se o PCI do material através do PCS, para isso foi necessário a análise elementar do material.

Para o cálculo do PCI foi utilizado os valores da análise elementar (Tabela 7) apresentada por Dal-Bó (2016).

Tabela 7 - Análise elementar da casca do café

Biomassa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Casca de café	45,6	5,65	43,65	2,15	0,2

Fonte: adaptado de Dal-Bó (2016).

Para o cálculo do PCI foi utilizada a Equação 3 (Grotto *et al.*, 2021).

$$PCI = PCS - (600 \times 0,09 \times \% H) \quad (3)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg);

H = teor de hidrogênio obtido após análise elementar.

O poder calorífico útil (PCU) foi calculado baseado na Equação 4 (Parikh, Channiwala e Ghosal, 2005).

$$PCU = \left(PCI \times (1 - (0,01 \times Ubu)) \right) - (600 \times 0,01 \times Ubu) \quad (4)$$

Onde:

PCU = poder calorífico útil (kcal/kg);

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

Ubu = umidade base úmida (%).

O PCU considera a umidade da amostra, que impacta diretamente no resultado, diminuindo seu valor. Foi considerada a Ubu seguindo o mesmo modelo de cálculo apresentado por Souza e Vale (2017), Tomeleri (2023) e Vale *et al.* (2007).

3.3 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL UTILIZANDO AFR

O cálculo do potencial de redução dos custos com combustível com a substituição do coque de petróleo pela casca de café foi realizado utilizando o PCI obtido no ensaio.

Para a análise do potencial de redução de custo com o uso de biomassa, foi utilizado modelo similar ao apresentado por Hemidat *et al.* (2019).

As premissas adotadas para o cálculo foram:

Premissas:

1. Energia para 1 tonelada de clínquer: 813.000 kcal;
2. Produção de 1.000 t de clínquer/dia – energia necessária: $8,13 \times 10^8$ kcal;
 - 2.1 Taxa de substituição: 15%;
 - 2.2 15% de substituição - energia necessária: $1,2195 \times 10^8$ kcal;
 - 2.3 85% da energia restante em coque de petróleo: $6,9105 \times 10^8$ kcal;
3. Quantidade de coque de petróleo para fornecer a 85% da energia necessária - 3,79 t/h;
 - 3.1 Economia de coque de petróleo de 0,67 t/h ou 4824 t/ano;
4. Produto considerado estável e homogêneo, sendo o PCI o valor obtido no ensaio. No caso do coque de petróleo o PCI adotado foi o valor médio apresentado na Tabela 3;
5. 7.200 horas/ano de produção (300 dias x 24 horas);
6. Para o preço do coque – o valor variou entre 1800 e 3000 renminbi (CNY) (Investing.com, 2024). Foi considerado o valor médio de \$ 2500 CNY. Para a conversão em Reais, foi utilizada a cotação de R\$ 0,68/1 CNY (Banco Central do Brasil, 2023).

7. Foi considerado como custo do combustível alternativo os gastos que seriam necessários com o descarte em um aterro - R\$ 207,57/t do resíduo descartado (Creutzberg, Ferrari e Engelage, 2016).
8. Foi estabelecida a premissa que a fabricação do briquete melhora em 15% as propriedades de PCI do material (Pasquali *et al.*, 2013).

Pasquali *et al.* (2013) consideraram o custo da casca de café na forma de briquete de R\$ 0,45/kg. Para ajuste do valor ao ano de 2024, foi considerada a inflação do período de 01/2013 a 12/2023 em 88% (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023c), chegando ao custo de R\$ 0,85/kg, porém o uso de briquetes só teria sentido em unidades que possuem o equipamento adaptado para essa utilização.

3.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O ensaio foi feito conforme a norma ABNT NBR 17054 (2022), que estabelece os parâmetros para ensaio de agregados. Devido à baixa densidade aparente do material, para o ensaio foi utilizado 300g de material seco.

As peneiras consideradas no ensaio são as da norma ABNT NBR 17054 (2022) e estão descritas na Tabela 8 e Figura 23. O ensaio foi realizado em um agitador de peneiras, com tempo de ensaio de 5 minutos e ajustado para 10 vibrações por segundo.

Tabela 8 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria

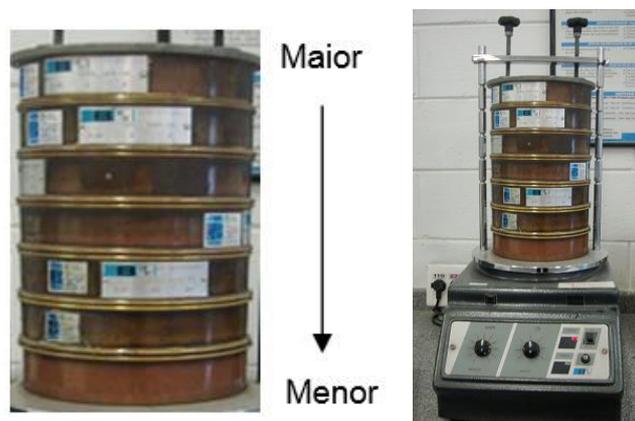
Peneira (mm)
12,5
9,5*
6,3
4,75*
2,36*
1,18*
0,6*
0,3*
<0,3

*. Peneiras da série normal definidas conforme norma NBR 17054 (2022)

Fonte: Autoria própria.

Modelo esquemático da montagem das peneiras.

Figura 23 - Orientação para montagem das peneiras e equipamento de agitação



Fonte: Autoria própria.

Foi calculado o módulo de finura (MF), que conforme a norma ABNT NBR 17054 (2022) estabelece é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal dividido por 100. Já a dimensão máxima característica é indicada pela peneira, da série normal ou intermediária, onde o percentual retido acumulado em massa é menor ou igual a 5% (ABNT NBR 17054, 2022).

3.5 ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA – TGA

Para o ensaio foi utilizado ar sintético (gás oxigênio) com fluxo de 20 ml/min e o ciclo com taxa de aquecimento de 20°C/min com aquecimento até 900 °C. O material foi preparado através do quarteamento e moagem. A quantidade de material utilizada no ensaio foi de 10,5 mg realizada em um equipamento Pyris 1 TGA. O ensaio foi realizado no material úmido (como recebido). Foram realizadas 2 repetições do ensaio.

3.6 ENSAIO DE TEOR DE CLORETOS (%)

O ensaio de cloretos foi realizado pela Votorantim Cimentos de acordo com a NBR 14832 (2002). A etapa de preparação da amostra, com quarteamento e secagem foi a mesma utilizada no ensaio de umidade. Após a secagem foi moído em um moinho tipo Willye modelo TE-680 até que toda amostra passasse na peneira de 75µm. Foi preparada uma amostra de 0,5g, pesada em balança Ohaus modelo AR-2140 com precisão de quatro casas decimais, do material moído. O ensaio foi realizado em um calorímetro Parr modelo 6200. Para a realização do ensaio foi preparada uma solução de carbonato de sódio (Na₂CO₃) 2%, sendo colocada 10 ml desta solução no interior da bomba calorimétrica para captura dos íons cloretos. A amostra foi então aquecida e após a combustão foi necessário aguardar 15 minutos para abertura do equipamento.

A solução obtida após a fusão do material no calorímetro foi então analisada em um potenciômetro multiparâmetros Orion Versa Star Pro equipado com eletrodos de íons de cloro através do método de potenciais elétricos. O ensaio foi repetido duas vezes, sendo seu resultado considerado válido se a diferença entre os resultados não superar 10%. Tal variação pode ocorrer devido a heterogeneidade do combustível alternativo.

3.7 ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata constitui os seguintes ensaios: material volátil (Mv), teor de cinzas (Tc) e teor de carbono fixo (TCf). Para a realização dos ensaios de Mv e Tc foi utilizado uma amostra de aproximadamente 10g que foi moída e seca em estufa.

Para a realização do ensaio de Mv foi utilizada a norma ASTM E872-82 (2019), norma esta utilizada em outros estudos (Rodrigues *et al.*, 2019; Tomeleri, 2023). Foram pesadas três amostras de um grama cada e colocadas em um cadinho para serem aquecidas em mufla a $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ por 7 minutos. Depois de resfriadas em dessecador, as amostras foram pesadas e o cálculo do percentual de material volátil foi feito de acordo com a Equação 5 abaixo.

$$Mv \% = \frac{m_{aq} - m_{pq}}{m_{aq}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

Mv = material volátil (%);

m_{aq} = massa de biomassa seca antes da queima (g);

m_{pq} = massa de biomassa pós queima (g).

Para o ensaio do teor de cinzas, foi utilizada como referência a norma ASTM E1755-01 (2020). O ensaio consiste em aquecer a amostra seca em mufla Quimis modelo Q318M24 a $575^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ por 3 horas. Foram pesadas 3 amostras moídas e secas de aproximadamente 0,25g em uma balança analítica. Após o resfriamento em dessecador a amostra foi pesada e levada novamente a mufla para mais 1 hora de queima e então resfriada em dessecador. Esse processo foi repetido até a estabilização da massa. A Equação 6 mostra como foi calculado o teor de cinzas (Tc) em porcentagem.

$$Tc \% = \frac{m_c}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

Tc = Teor de cinzas (%);

m_c = massa de cinza (g);

m_s = massa seca inicial (g).

As cinzas são potenciais causadoras de problemas de incrustação e deposição que podem causar entupimentos e corrosão no sistema (García *et al.*, 2015; Matsuda *et al.*, 2005; Rocha, Lins e Santo, 2011; Ruozzi *et al.*, 2023; Saenger *et al.*, 2001).

O teor de carbono fixo foi obtido através da Equação 7 .

$$TCf = 100 - (Mv + Tc) \quad (7)$$

Onde:

TCf = teor de Carbono fixo (%);

Mv = Material volátil (%);

Tc = Teor de cinzas (%).

3.8 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂

Realizada a análise imediata, é possível calcular a emissão potencial de CO₂/t de biomassa e verificar qual o potencial de redução em relação ao combustível fóssil utilizado.

As Equações 8 à 11 exemplificam o modelo de cálculo utilizado (Murray e Price, 2008).

Na Equação 8 é apresentado o modelo de cálculo do fator de emissão de C (FeC) do combustível fóssil. Na equação foi considerado como combustível fóssil o coque de petróleo. Para o cálculo do FeC do coque de petróleo, foram considerados os parâmetros da análise imediata (Tabela 9) apresentados por estudo de Méndez (2005).

Tabela 9 - Análise imediata do coque de petróleo

Umidade e análise imediata do coque de petróleo			
Teor de umidade (%)	Mv (%)	Tc (%)	TCf (%)
6,87% ± 0,4%	14,42% ± 0,3%	0,04% ± 0,0%	85,54% ± 0,3%

Fonte: adaptado de Méndez (2005).

O cálculo está apresentado na Equação 8.

$$1 \text{ t } x \frac{(1 - 6,87\%) \text{ t material seco}}{1 \text{ t}} x \frac{0,8553 \text{ TCf}}{1 \text{ t de material seco}} \quad (8)$$

$$= 0,7966 \frac{\text{t C}}{\text{t}} \text{ ou } 79,66\%$$

Calculado o FeC do coque de petróleo é possível calcular a quantidade de CO₂ emitida para cada tonelada de coque consumida (Equação 9).

$$\frac{0,7966 \text{ t C}}{1 \text{ t coque}} x \frac{44 \text{ t CO}_2}{12 \text{ t C}} = 2,92 \frac{\text{t CO}_2}{\text{t coque de petróleo}} \quad (9)$$

O mesmo procedimento de fator de emissão de carbono e quantidade emitida de CO₂ por tonelada de material foi aplicado à biomassa da casca de café.

Para o cálculo da quantidade de biomassa necessária para realizar a substituição de 1 tonelada de coque de petróleo utiliza-se o PCI dos 2 combustíveis analisados. A Equação 10 mostra como é feito o cálculo.

$$\frac{PCI \frac{kcal}{kg} \text{ coque de petróleo}}{PCI \frac{kcal}{kg} \text{ biomassa}} = \frac{t \text{ de biomassa}}{1 t \text{ de coque de petróleo}} \quad (10)$$

Para a biomassa casca de café utilizando os dados da U_{bu}, análise imediata da biomassa e através dos cálculos apresentados nas Equações 8 e 9 chegamos à emissão de CO₂ por tonelada de biomassa. Utilizando o PCI calculado da AFR e o PCI do coque de petróleo apresentado em literatura, chegamos à quantidade necessária de biomassa de casca de café para substituir uma tonelada de coque.

Com estes valores é possível calcular a emissão de CO₂ gerada pelo AFR com essa substituição e se existe redução na emissão quando comparado com o coque de petróleo. O modelo de cálculo está explicado na Equação 11 abaixo.

$$\begin{aligned} \frac{t \text{ de casca de café}}{1 t \text{ de coque de petróleo}} \times \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ de casca de café}} &= \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ de coque substituído}} \\ \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ de coque substituído}} - 2,92 \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ coque de petróleo}} & \\ &= \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ de coque substituído por casca de café}} \end{aligned} \quad (11)$$

3.9 ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O ensaio foi realizado no laboratório da Votorantim Cimentos e o equipamento utilizado foi espectômetro PW4400 – Axios da marca Malvern Panalytical (Figura 24).

Figura 24 - Espectômetro de fluorescência de Raio-X



Fonte: Malvern Panalytical.

Para a realização do ensaio foram pesadas 12g de cinzas e misturadas com 1g de aglutinante. Após a mistura o material foi homogeneizado por 1 minuto em um moinho Herzog. Com a mistura resultante foi feita uma pastilha fazendo a prensagem a uma pressão de 1t.

O estudo de García *et al.* (2015) mostraram que elevadas concentrações de elementos com baixa temperatura de fusão, por exemplo: Na, K e Cl pioram a ocorrência de problemas como incrustações e deposições. Este mesmo estudo correlacionou o potencial para incrustações através da razão base/ácida das cinzas (Equação 12) e concentração dos óxidos de potássio e sódio (Equação 13).

$$R_{b/a} = \frac{Fe_2O_3 + Na_2O + CaO + MgO + K_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} \quad (12)$$

Onde:

$R_{b/a}$ = Razão base/ácida

Se houver a presença de P_2O_5 , este pode ser adicionado como um óxido básico (García *et al.*, 2015).

Valores menores que 0,5 apresentam baixo risco para deposição, entre 0,5 e 1,0 risco médio e acima de 1,0 risco elevado (García *et al.*, 2015).

A Equação 13 mostra o modelo de cálculo realizado para entender o risco de inscrustações no sistema.

$$II = R_{b/a} \times (Na_2O + K_2O) \quad (13)$$

Onde:

II = índice de incrustação

Valores abaixo de 0,6 apresentam baixo risco, risco elevado para valores entre 0,6 e 40,0 e acima de 40,0 o risco extremamente elevado (García *et al.*, 2015).

3.10 ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente ou densidade a granel foi calculada segundo a Equação 14.

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ens} - M_{rec}}{V_{rec}} \quad (14)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

M_{ens} = massa do material ensaiado somada a massa do recipiente (g);

M_{rec} = massa do recipiente utilizado no ensaio (g);

V_{rec} = volume do recipiente utilizado no ensaio (cm³).

Para a realização deste ensaio, a amostra foi utilizada úmida, pois o objetivo é entender como a casca de café “in natura” impacta no transporte e armazenagem na operação. Foi realizado o quarteamento da amostra, conforme já explicado no procedimento de umidade. O recipiente utilizado foi um béquer de plástico de 2000 ml que foi preenchido de material até o topo utilizando-se uma concha metálica posicionada a 10 cm de altura do béquer, a biomassa foi adensada apenas com o peso próprio do socador e depois foi feito o rasamento (Figura 25). Foi pesada a quantidade de material e o resultado de densidade aparente foi obtido. O ensaio foi repetido por duas vezes.

Para este ensaio foi criado um padrão para a execução, tendo como objetivo entender o impacto da densidade aparente na logística e operação fabril.

Optou-se pelo uso do socador, pois na logística de carregamento e de armazenamento na operação o material sofrerá adensamento durante o carregamento.

Figura 25 - Ensaio de densidade aparente



Fonte: Autoria própria.

3.11 RAZÃO DE HAUSNER

Este ensaio serve para medir o grau de escoabilidade, pois mede o atrito entre as partículas do material (Grey e Beddow, 1969).

A razão de Hausner (RH) pode ser calculada conforme a Equação 15.

$$RH = \frac{\rho_{cp}}{\rho_{aps}} \quad (15)$$

Onde:

RH = razão de Hausner;

ρ_{aps} = densidade aparente solta (g/cm^3);

ρ_{cp} = densidade compactada (g/cm^3).

Para a realização deste ensaio, foi utilizada tanto a casca seca (Teste 3) quanto a casca úmida (Testes 1 e 2). No caso da amostra utilizada úmida, o objetivo é entender como a casca de café “in natura” se comporta durante o transporte do local de armazenamento na fábrica para os fornos da torre de ciclones. Foi realizado o quarteamento da amostra, conforme já explicado no procedimento de umidade. Após o quarteamento, três amostras foram separadas para a realização do ensaio sendo que uma foi seca. Foram pesados 150 gramas para cada teste. Na densidade aparente solta (ρ_{aps}) não existe qualquer compactação, sendo apenas o efeito da gravidade sobre o material. A densidade compactada (ρ_{cp}) foi feita utilizando-se um recipiente

de volume conhecido e não deformável, que no ensaio foi uma proveta de 2000 ml (Figura 26). A colocação da casca de café na proveta foi realizada com o auxílio de uma concha metálica (Figura 28). O adensamento foi realizado através dos golpes se utilizando uma mesa de consistência de argamassa conforme norma NBR 13276 (2016). A quantidade de golpes utilizada foi 30, 60, 90, 120, 150 e 180 golpes, fazendo a marcação do volume em cada uma destas etapas e seguindo o descrito no item 5.2.4 desta mesma norma. A pesagem do material foi feita em uma balança Marte modelo AD 3300. A mesa possui um entalhe que causa uma queda a cada giro da manivela (Figura 27). Foi utilizada fita na base da proveta e na superfície da mesa para manter a mesma travada com os golpes.

Figura 26 - Mesa de adensamento para ensaio de RH



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Entalhe no sistema da mesa de adensamento para geração do impacto



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Colocação da casca de café no recipiente



Fonte: Autoria própria.

No ensaio foi feito também o teste com a amostra seca. Na operação, o produto será utilizado como recebido, ou seja, úmido, porém o intuito foi verificar qual efeito a umidade traria ao comportamento do material e, conseqüentemente, a operação no dia a dia de utilização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE UMIDADE NA BASE SECA E NA BASE ÚMIDA

Os resultados obtidos no ensaio estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio de umidade base seca e base úmida

Identificação	Teor de umidade (%)
Umidade Base Seca - U_{bs}	$14,76 \pm 1,95$
Umidade Base Úmida - U_{bu}	$12,85 \pm 1,48$

Fonte: Autoria própria.

A umidade é fator importante para análise da viabilidade ambiental e técnica. Conforme a Equação 8, o FeC está associado a umidade do material, portanto está associado também as emissões de CO₂ da biomassa.

A umidade impacta o poder calorífico do material, pois ela abaixa o PCU conforme descrito na Equação 4. Quanto maior a umidade menor o poder calorífico do combustível, pois parte da energia liberada acaba sendo utilizada para evaporação da água, ou seja, são grandezas inversamente proporcionais (Lima, Abdala e Wenzel, 2008). Estudo de Lima, Abdala e Wenzel (2008) mostrou que o PCS da madeira variou em até 48% (material seco em comparação ao material com 50% de umidade base úmida). Este resultado é bem similar ao estudo de Swithenbank *et al.* (2011) que identificou que para cada 10% de aumento da umidade havia uma redução de 478 kcal/kg no poder calorífico do combustível analisado (madeira). Mesmo sendo biomassas diferentes (madeira e café) o intuito foi exemplificar o efeito da umidade no poder calorífico do combustível.

O impacto negativo no poder calorífico do material, faz com que uma quantidade maior de material seja necessária para produzir a mesma energia quando comparado com o combustível fóssil, demandando uma maior oferta do material e maiores custos de logística e armazenagem, sendo fator inclusive para determinação de preço da biomassa (García *et al.*, 2017; Simioni e Hoeflich, 2010). Os valores obtidos de umidade podem ser considerados um facilitador no caso da opção de transformação da casca de café em briquetes. Estudos de S. Hansted *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2015) concluíram que o valor de umidade ideal é de 12%, porém resultados satisfatórios foram obtidos até 15% de umidade.

Os resultados obtidos no ensaio são semelhantes com o esperado pela literatura (Lima, Gomes e Moraes, 2022; Saenger *et al.*, 2001). Quando comparamos a umidade obtida na casca

de café com outras biomassas oriundas de resíduos agrícolas apresentadas na literatura os valores são bem similares, não sendo esse um fator limitante a utilização da casca do café (Vieira, 2012; Xu, Li e Lu, 2019).

4.2 ENSAIO DE PODER CALORÍFICO – PCS, PCI E PCU

Esse é um fator crítico na análise da viabilidade técnica para utilização do material como AFR, visto que este parâmetro indica a quantidade de calor que será liberada na combustão do material. Biomassa com valores muito baixos acabam por demandar uma grande quantidade na substituição do coque de petróleo, sendo que para viabilizar a utilização de qualquer material como combustível alternativo o PCI não pode ser inferior a 3.000 kcal/kg (Kusuma *et al.*, 2022; Madloul *et al.*, 2011; Sellitto *et al.*, 2013).

A norma ABNT NBR 11956 (1990) define PCS como o calor produzido pela combustão do material onde toda a água restante ainda esteja no estado líquido. A mesma norma considera o PCI o calor produzido pela combustão do material onde a água resultante esteja no estado gasoso. Logo o PCI é menor, pois se considera a energia necessária para evaporação da água presente no material. A Tabela 11 abaixo indicam os resultados obtidos de PCS, PCI e PCU.

Tabela 11 – Resultados de PCS, PCI e PCU

Resultados de PCS, PCI e PCU	
PCS (kcal/kg)	3.803,94 ± 141,56
PCI (kcal/kg)	3.498,94 ± 141,56
PCU (kcal/kg)	2.971,21 ± 235,73

Fonte: Autoria própria.

O valor obtido está em concordância com valores presentes na literatura e em linha com outras biomassas de origem agrícola, por exemplo: casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, caule de algodão, pinus (Tabela 12; SILVA, (2012)).

Tabela 12 - PCS e PCI de outras biomassas

Biomassa	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Casca de arroz	3513,39	3178,78
Bagaço de cana de açúcar	4469,41	4087,00
Caule de algodão	4158,70	3848,00
Pinus	4732,32	4349,91

Fonte: adaptado de Silva (2012).

Estudo de Protásio et al. (2011) identificou que a casca de café tem alto potencial para a transformação em briquete, o que elevaria o poder calorífico do AFR e otimizaria a logística. A briquetagem traz como vantagens a redução no espaço de armazenamento, podendo chegar a até 11 vezes menor que o volume da biomassa “in natura”, trazendo redução nos custos de transporte e melhoria na eficiência energética através da densificação da biomassa (Furtado *et al.*, 2010; Sousa Dias *et al.*, 2012).

4.3 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL UTILIZANDO AFR

Com os resultados obtidos no ensaio de poder calorífico, foi calculado o potencial de redução de custos diretos com combustível apresentados na Tabela 13.

A casca de café mostrou um potencial de redução de aproximadamente R\$ 6,06 milhões/ano nos custos de combustível.

No caso do uso de briquetes o potencial de redução seria de R\$ 498,7 mil/ano (Tabela 13), entretanto a análise realizada considera apenas o custo direto da troca do combustível (coque de petróleo em comparação à casca de café) e foi considerado que a briquetagem traria um ganho de PCI de 15%. O uso da AFR compactada reduz também o custo de transporte e armazenamento do combustível (Furtado *et al.*, 2010; Sousa Dias *et al.*, 2012).

Tabela 13 - Viabilidade econômica da utilização da casca de café

Combustível analisado	PCI Médio (kcal/kg)	Quantidade de combustível (t/h)	Taxa de substituição por t de coque de petróleo (t)	Consumo anual de combustível (t)	Custo do combustível (R\$) 1 tonelada	Ano	Economia com o uso de combustível (R\$/ano)
Coque de petróleo	7588	-	-	4821	R\$ 1.706,43	R\$ 8.227.159,30	-
Casca de café	3499	1,45	2,169	10456	R\$ 207,57	R\$ 2.170.368,93	-R\$ 6.056.790,37
Briquete Casca de café	4024	1,26	1,886	9092	R\$ 850,00	R\$ 7.728.365,44	-R\$ 498.793,86

Fonte: Autoria própria.

4.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O ensaio de granulometria define a distribuição dos tamanhos das partículas. Este ensaio tem correlação direta com a densidade aparente do material e a sua reatividade. A Tabela 14 mostra o resultado obtido no ensaio da casca de café.

Tabela 14 - Ensaio de granulometria

Peneira (mm)	Média (g)	Sd (g)	% Retido	% Retido Acumulado
12,5	0,0	0,0	0%	0%
9,5	0,3	0,4	0%	0%
6,3	31,6	2,9	11%	11%
4,75	65,5	6,9	22%	32%
2,36	133,8	1,0	45%	77%
1,18	48,3	1,8	16%	93%
0,6	12,4	2,1	4%	97%
0,3	4,0	0,9	1%	99%
<0,3	3,6	0,5	1%	100%
Total	299,5	0,3		
Módulo de finura (MF)				3,99
Dimensão máxima característica (mm)				9,5 mm

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que 66% do material tem o tamanho entre 6,3 > biomassa > 2,36 mm, tendo o material tamanho menor que 9,5 mm em quase sua totalidade. Isso explica o a sua dimensão máxima característica ser de 9,5mm. Quando analisamos a granulometria da casca de café com outras biomassas: a casca possui granulometria mais grossa que a casca de arroz por exemplo (Fernandes *et al.*, 2015); comparando com cavacos de madeira, a granulometria da casca de café (MF de 3,99) seria similar a um cavaco de madeira fino até 3mm (Lippel, 2024).

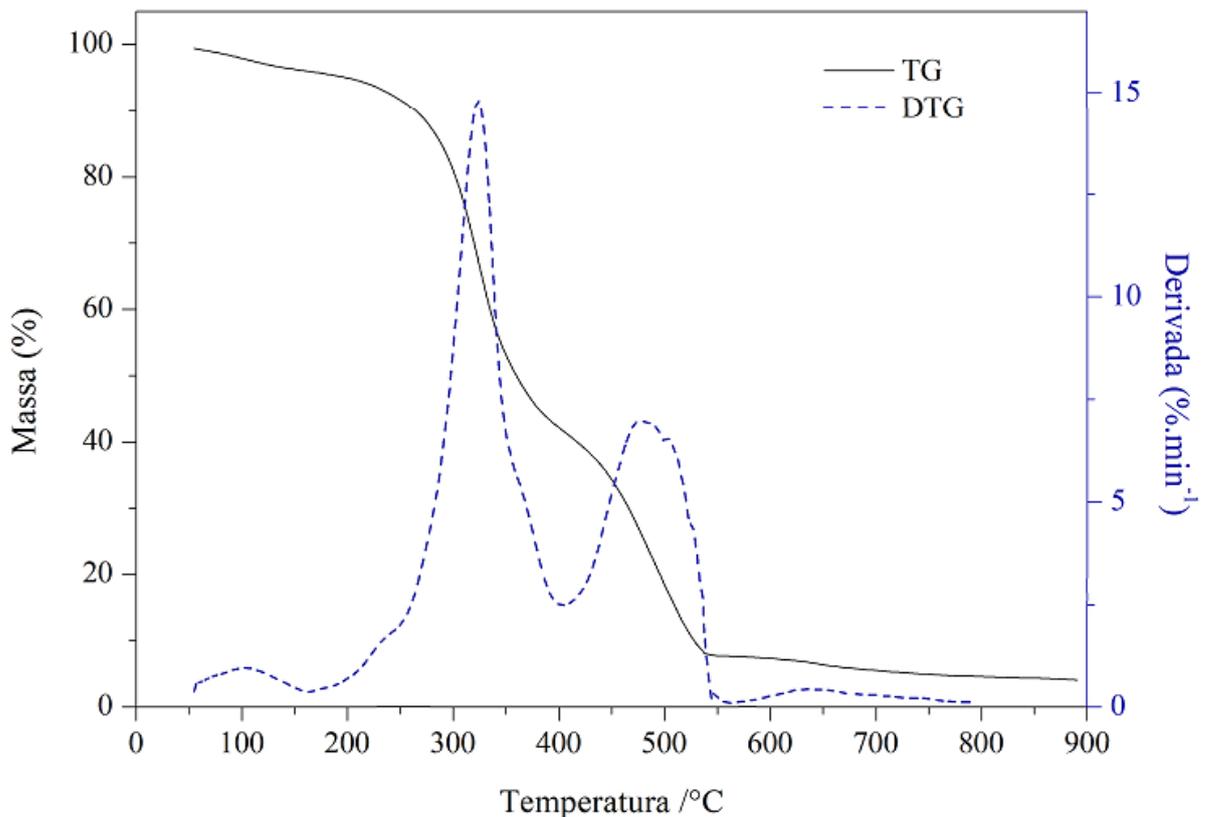
Isso indica um material mais fino, logo conforme estudo de Fernandes *et al.* (2015) com uma maior área de contato para queima e impactando também na liberação dos voláteis. Comparando a casca de café com a casca de arroz do estudo de Fernandes *et al.* (2015), estas biomassas possuem granulometrias bem similares. A granulometria apresentada também contribui para a briquetagem da casca de café, pois o material se encontra dentro da faixa ideal (A. da Silva *et al.*, 2018).

4.5 ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA – TGA

O resultado da análise termogravimétrica (TGA) da casca de café está na Figura 29.

O objetivo deste ensaio é verificar o comportamento durante a queima da casca de café com o aumento da temperatura, indicando a faixa de temperatura onde ocorre a maior parte da decomposição do material e buscar traçar uma equivalência com o processo industrial. Foi possível desta maneira, fazer uma correlação se haveria a queima e decomposição do material na torre de ciclones.

Figura 29 - Ensaio de TGA



Fonte: Autoria própria.

Foram feitas 2 repetições do ensaio, porém as curvas ficaram bem similares, sendo apresentado no gráfico a curva com o valor médio dos 2 testes.

Observou-se uma queda da massa até 150°C que está associada à evaporação da água presente na amostra. A degradação da casca de café ocorreu em outras 2 etapas, entre 250°C até 400°C (1ª etapa de queima) e de 400°C até 550°C (2ª etapa de queima). Este comportamento já era esperado devido à diferença de temperatura de degradação dos materiais celulósicos e da lignina, sendo representados pelos picos da DTG entre 250°C e 550°C (Campos *et al.*, 2020).

No gráfico apresentado na Figura 29, verificasse que a 1º etapa de queima, que compreende a queima dos materiais celulósicos, e ocorre entre 250°C à 400°C corresponde a perda de aproximadamente 50% de massa da amostra. A 2º etapa de queima, que corresponde a combustão da lignina ocorre entre 400°C à 550°C e representa a perda de 35% da massa da amostra.

A faixa de temperatura de queima da biomassa da casca de café indica que o produto pode ser utilizado na torre de ciclones, pois nesta etapa a temperatura chega a aproximadamente 900°C e, o coque de petróleo por exemplo, tem temperatura de ignição a 750°C (Filho, 2020).

4.6 ENSAIO DE TEOR DE CLORETOS (%)

O ensaio de cloretos é fator crítico na utilização do AFR, pois o excesso de cloretos pode ocasionar problemas de entupimento no sistema assim como uma deterioração do sistema por corrosão. Além disso a incorporação de cloretos ao clínquer é danosa, pois este ataca a proteção passiva das armaduras no concreto, diminuindo a vida útil da estrutura (Rocha, Lins e Santo, 2011; Ruozzi *et al.*, 2023).

O valor obtido no ensaio foi de **0,164±0,087%**, valor este abaixo do especificado no estudo de Kusuma *et al.* (2022). Quando comparadas com outras literaturas como Wrap (2012) e Gerassimidou *et al.* (2021) que falam em 0,8% e 1,0% respectivamente para utilização de CDR como combustível, mesmo sendo mais restritivas, os valores obtidos no ensaio atendem a essa demanda. Estes valores confirmam o potencial para utilização da biomassa da casca do café.

4.7 ANÁLISE IMEDIATA

Os resultados obtidos na análise imediata estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise Imediata da casca do café

Material	Análise Imediata		
	Mv (%)	Tc (%)	TCf (%)
Casca do café	76,02 ± 0,66	5,09 ± 0,17	18,89 ± 0,48

Fonte: Autoria própria.

Resultados de Mv e TCf da casca de café obtidos no estudo de Dal-Bó (2016) foram de 75,03% e 19,43% respectivamente, valores bem similares aos obtidos nos ensaios.

Os resultados apresentados na análise imediata indicam o potencial da biomassa para utilização como combustível devido ao teor de materiais voláteis elevado e baixo teor de cinzas. Quando comparado com a análise imediata da casca de eucalipto, AFR bastante utilizada no

coprocessamento para fabricação de clínquer, estudado por Filho (2020) os valores são similares (Mv 78,52%, Tc 4,92% e Tcf 16,67%).

Segundo Rodrigues *et al.* (2019), Mv elevado contribui para reatividade e para o processo de combustão. Quando comparados os resultados obtidos com outras biomassas lignocelulósicas como a casca de arroz e casca de amendoim, a casca de café apresenta Mv maior que a casca de arroz e similar a casca de amendoim. A Tabela 3 apresenta a análise imediata de alguns AFR e à comparação com a casca de café explica o potencial para utilização do produto. Outras biomassas agrícolas como palhas de soja, palha de milho, palha e casca de arroz possuem valores de Mv menores, o que mostra que a casca de café é mais eficiente para queima (Cortada Mut, Nørskov, Frandsen, *et al.*, 2015; Xu, Li e Lu, 2019).

As cinzas restantes do processo de queima têm potencial para serem incorporadas ao clínquer e, conseqüentemente, ao cimento. Estudo de Saenger *et al.* (2001) mostrou que o K₂O baixa o ponto de fusão da cinza para valores próximos a 800-900°C, que compreende a temperatura próxima a chama na torre de ciclones (Filho, 2020). Portanto todo o material deve se volatilizar no processo, o que é interessante para não incorporar ao cimento produzido, porém pode causar problemas de entupimento e corrosão na parte fria do forno (Saenger *et al.*, 2001).

Estudo de Xu, Li e Lu (2019) mostrou que a casca de café comparada com a biomassa de arroz possui Tc mais baixo, biomassas de soja e milho valores similares. Essas cinzas oriundas da queima têm potencial para serem incorporadas ao cimento produzido.

Quando analisamos o Tcf das biomassas lignocelulósicas, estas possuem valores entre 14,1% à 17,5%, portanto as emissões de CO₂ são similares entre essas biomassas (Cortada Mut, Nørskov, Frandsen, *et al.*, 2015; Xu, Li e Lu, 2019).

4.8 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂

Seguindo o modelo proposto na Equação 10, a quantidade de casca de café necessária para a substituição de 1 tonelada de coque de petróleo é de 2,17 toneladas. Para este cálculo foi utilizado o PCI médio do coque de petróleo de 7.588 kcal/kg apresentado na Tabela 3 e o PCI da casca de café obtido através do ensaio apresentado na Tabela 10.

Foi realizado os cálculos de emissão da casca de café, calculando o FeC da casca de café sendo obtido o valor de 16,46%.

Utilizando o modelo da Equação 9, as emissões de CO₂ da casca de café foram de 604 kg CO₂/t de casca de café, porém são necessárias 2,17 toneladas de AFR, logo a quantidade de emissão para cada tonelada de coque substituído é de 1,309 t CO₂. O potencial de redução, por tonelada substituída de coque de petróleo está apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Potencial de redução de emissão de CO₂ da casca do café

Material	Fator de emissão de CO₂	Redução na emissão de CO₂
Casca do café	0,604 t CO ₂ /t de casca de café	-1,612 t CO ₂ /t de coque de petróleo substituído por casca de café

Fonte: Autoria própria.

A análise das emissões, mostrou um potencial de redução de 55,18% nos níveis de emissões quando se substitui 1 tonelada coque de petróleo por biomassa da casca de café.

A demanda energética para a produção de 1 tonelada de clínquer é de 813.000 kcal, logo é necessário 232,36 kg de casca de café/t de clínquer.

Estudos realizados comprovam o benefício do uso de fontes alternativas de energia, por exemplo: Wojtacha-Rychter, Kucharski e Smolinski (2021), que estudaram o uso de diferentes tipos de combustíveis alternativos na Polônia, estimaram uma economia de €\$ 55 milhões/ano com carvão a taxa de substituição de 70%. Com relação as emissões, os autores calcularam a relação entre TCF e o PCI e constataram que combustíveis alternativos com alto TCF e baixo PCI não são efetivos com relação a redução das emissões de CO₂. Esse resultado já era esperado, visto que a quantidade de CO₂ emitida está associada ao TCF e U_{bu}. O PCI mais baixo implica em maiores quantidade de combustível para fornecer a mesma quantidade de energia requerida no processo.

4.9 ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Este ensaio permite se fazer uma análise semiquantitativa do material, no caso as cinzas oriundas da queima da biomassa da casca de café a 500°C, mostrando quais os óxidos presentes e quantificando a proporção de cada um (Fernandes, 2019).

Os resultados obtidos no ensaio estão descritos na Tabela 17. A análise mostrou que 73% das cinzas provenientes da queima são compostas de óxido de potássio, dióxido de silício e óxido de cálcio. Este valor é similar ao encontrado na literatura (Tabela 6).

Tabela 17 - Resultado da espectometria de fluorescência de Raio-X

(continua)			
Composto	Fração (%)	Composto	Fração (%)
K ₂ O	46,483	MnO	0,138
SiO ₂	13,975	Rb ₂ O	0,066
CaO	12,542	Cr ₂ O ₃	0,062

(conclusão)			
Composto	Fração (%)	Composto	Fração (%)
Al ₂ O ₃	9,783	CuO	0,05
Fe ₂ O ₃	4,776	SeO	0,044
SO ₃	3,501	ZrO ₂	0,029
MgO	3,382	Ga ₂ O ₃	0,005
P ₂ O ₅	3,272	Br	0,004
Cl	0,823	Nb ₂ O ₅	0,004
ZnO	0,595	Na ₂ O	0,000
TiO ₂	0,463	CO ₂	0,000

Fonte: Autoria própria.

A geração de cinzas é provavelmente o ponto crítico da utilização de biomassas, visto que o valor apresentado é 125 vezes maior que o apresentado pelo coque de petróleo (Tabelas 9 e 15). Através do resultado obtido foi calculada a razão base/ácido. No cálculo da razão base/ácido o composto P₂O₅ foi considerado um óxido básico. O resultado indicou um valor de R_{b/a} de 2,91, o que indica um risco elevado de deposição. O índice de incrustação obtido foi de 135,21, indicando um risco extremamente elevado.

A composição da casca de café depende de inúmeros fatores, por exemplo: espécie da planta, processo de crescimento e suas condições, idade da planta, uso e tipo de fertilizantes (este influencia o teor de K, Cl, N, P e S), local da plantação etc. (Vassilev *et al.*, 2010). Estudo de Baxter *et al.* (1998) mostrou que a presença de potássio é elevada em biomassas lignocelulósicas (palha) e contribuem para formação de depósitos e incrustações em caldeiras. O caroço de açaí, que é uma biomassa testada e aprovada em escala industrial, é uma biomassa com R_{b/a} 0,97 e II de 18,3 o que indica risco médio e elevado de deposição e incrustação respectivamente (Cordeiro *et al.*, 2019).

4.10 ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE

Este parâmetro influi diretamente nos custos atrelados ao frete, que usualmente são feitos em R\$/tonelada ou R\$/tonelada.km, e no volume ocupado para armazenamento (García *et al.*, 2017; Martins, 2008; Soares e Caixeta Filho, 1997).

O ensaio de densidade aparente a granel mostrou que o material tem grande potencial, visto que seu valor foi superior à de outras biomassas utilizadas, por exemplo: 35% superior a casca de arroz e palha picada (Saenger *et al.*, 2001). O resultado obtido (Tabela 18) é similar com o encontrado na literatura de 184 kg/m³ (Saenger *et al.*, 2001). A densidade aparente impacta diretamente nos custos do processo, visto que quanto menor o valor maior são os custos

de transporte e estocagem. O ensaio foi realizado com o material úmido e percebe-se o impacto da umidade no resultado, sendo a densidade a granel maior na amostra com maior umidade.

Tabela 18 - Resultado de densidade aparente

Densidade a Granel				
Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Média	sd
Ubs	16,14 %	14,86 %	15,50 %	0,91 %
kg/m ³	189,25	180,37	184,81	6,28

Fonte: Autoria própria.

O resultado foi fundamental para avaliação econômica, visto que densidades aparentes baixas impactam: na eficiência energética por volume de biomassa, dificuldade no controle do processo, dificuldade na alimentação da chama, custos mais elevados no transporte, maior necessidade de espaço no armazenamento (WRAP, 2012).

Analisando o volume ocupado, pensando em logística e espaço de armazenamento, obteve-se os seguintes valores (Tabela 19).

Tabela 19 - Demanda de casca de café e comparativo volume ocupado

Material	Demanda para produção de 1 t de clínquer	Densidade aparente (kg/m³)	Volume ocupado para produção de 1 t de clínquer	Ref.
Coque de petróleo	107 kg	860	0,12 m ³	[1]
Casca de café	232 kg	184,81	1,26 m ³	-

[1] - (Santos, 2007)

Fonte: Autoria própria.

Logo, a casca de café demanda um volume 10,09 vezes maior que o volume de coque de petróleo.

4.11 RAZÃO DE HAUSNER

Ensaio que mede o grau de escoabilidade de um material, ou seja, como seria o comportamento no abastecimento da torre de ciclones durante a operação.

A Tabela 20 correlaciona a razão de Hausner (RH) com a escoabilidade do material (Lameiras, 2019).

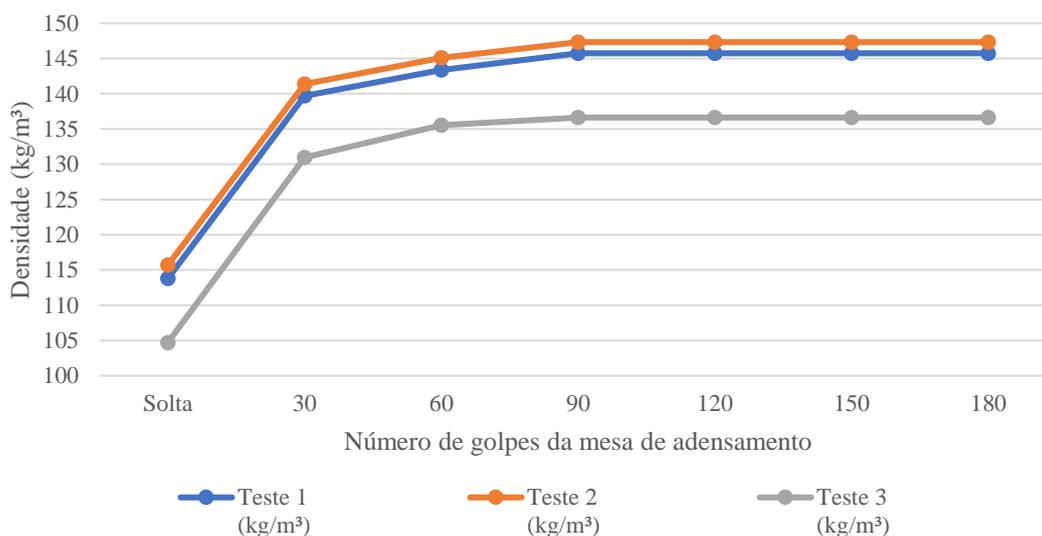
Tabela 20 - escoabilidade em função da RH

RH	Capacidade de escoamento
1,00 - 1,11	Excelente
1,12 - 1,18	Boa
1,19 - 1,25	Aceitável
1,26 - 1,34	Fraca
1,35 - 1,45	Ruim
1,46 - 1,59	Muito ruim
> 1,60	Péssima

Fonte: adaptado de Lameiras (2019).

Os resultados apresentados têm como referência o número de 60 golpes na mesa de adensamento. Este valor ficou definido, pois após 60 golpes foi observada uma variação muito pequena na densidade durante os testes não sendo possível ver a variação devido a precisão do ensaio. A Figura 30 mostra a evolução da densidade medida de acordo com o número de golpes aplicado.

Figura 30 – Variação da densidade em função do número de golpes



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 21 indicou o resultado obtido no ensaio. Percebe-se que a umidade tem efeito direto a escoabilidade do material, visto que o ensaio com o material seco apresentou um resultado 3% maior na RH, o que indica uma piora na escoabilidade do AFR. Isso ocorreu devido uma piora na compactação do material, oriundo da menor umidade da biomassa. Esse comportamento da densidade em função da umidade também foi observado no ensaio de densidade aparente.

Tabela 21 - Ensaio da RH

Parâmetros	Medidas					
	Teste 1	Teste 2	Média	Sd	Teste 3	Diferença
Razão de Hausner	1,26	1,25	1,26	0,00	1,29	2,95%

Fonte: Autoria própria.

O resultado obtido, segundo a Tabela 20 indica que o material possui escoabilidade no limite entre aceitável e fraca quando utilizado úmido. O resultado obtido diverge do apresentado por Silva (2012), porém este ensaio é uma adaptação e precisaria de mais resultados para um melhor entendimento deste comportamento.

Estudos de Farias (2012) e Xu, Li e Lu (2019) estabeleceram uma relação diretamente proporcional entre o tamanho médio da partícula e a RH, neste caso com o aumento do tamanho médio a RH também aumenta, piorando a escoabilidade.

4.12 RESUMO

A Tabela 22 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios e o comparativo com outras biomassas, sendo utilizado o valor médio no caso de a propriedade ser apresentada em um intervalo.

Tabela 22 - Comparativo entre biomassas

Biomassa	PCI (kcal/kg)	Análise Imediata			Ref.
		Mv* (%)	Tc* (%)	TCf* (%)	
Casca do café	3.498,94	76,02	5,09	18,89	
Casca de eucalipto	3.919,34	78,52	4,92	16,67	[1]
Casca de arroz	3.680,60	65,00	17,5	16,5	[2, 3]
Palha	4.325,90	72,40	12,4	16,3	[4, 5]
CDR	3.346,00	72,00	20,00	8,00	[6, 7]

*. Utilizado os valores médios quando apresentados em intervalo na literatura

[1] - (Filho, 2020)

[2, 3] - (IEA Bioenergy, 2013; Tsubouchi *et al.*, 2005)

[4, 5] - (Stenseng, 2001; Vassilev *et al.*, 2010)

[6, 7] - (Kobyashi *et al.*, 2005; Tokheim, 1999)

Fonte: autoria própria.

O potencial de redução de CO₂ para cada tonelada de coque substituído é de 1,612 t de CO₂, logo utilizando a casca de café a uma taxa de substituição de 15% (outros 85% se mantêm o coque de petróleo) temos o potencial de redução de 25,90 kg de CO₂/t de clínquer produzido.

Dados do SNIC (2023) mostram um volume total de cimento produzido nos estados de Minas Gerais e São Paulo em 2022 de 24,99 milhões de toneladas, e considerando o fator clínquer médio de 0,67 apresentado em Roadmap Tecnológico do Cimento (2019), ou seja, para cada tonelada de cimento produzido 67% é clínquer, temos então um total aproximado de 16,75 milhões de toneladas de clínquer produzido nestes 2 estados. Logo se fosse feita a substituição de 15% apenas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, dois dos maiores produtores nacionais de cimento e café, o potencial de redução nas emissões de CO₂ chegaria a 434 mil toneladas de CO₂ no ano de 2022.

Já o potencial de redução de custo com combustível ficou em R\$ 6,06 milhões/ano, porém utilizando a mesma métrica da emissão de CO₂, temos que 16,75 milhões de toneladas de clínquer foram produzidas em SP e MG. Estes dois estados concentram 26 das 93 plantas do Brasil segundo dados do SNIC (2022), isso representaria um total de 2.147 t/clínquer por dia/fábrica do SE, considerando que todas as 26 unidades fabris produzem clínquer e o ano com 300 dias (mesma premissa adotada na análise do item 3.3). Estes números trariam uma redução nos custos com o combustível fóssil aproximada por fábrica de R\$ 13 milhões/ano.

Para suprir essa demanda de 15% de taxa de substituição e utilizando as mesmas premissas adotadas no item 3.3, seria necessária uma oferta de 22,4 mil toneladas de casca/fábrica. Como a região tem um total de 26 fábricas a demanda seria de 583,8 mil toneladas de casca de café para os estados de MG e SP. A safra de 2022 de café foi de 3,17 milhões de toneladas sendo 80% deste total beneficiado a seco, logo 2,54 milhões de toneladas. Como o aproveitamento do fruto é de 50%, estimasse uma geração de biomassa de casca de café de 1,27 milhões de toneladas, valor que representa o dobro da demanda teórica para os estados de MG SE. Se levarmos em conta que MG e SP juntos concentram 53% da produção de café, então o potencial de geração de biomassa da casca de café nestes estados seria de 672 mil toneladas, valor que atenderia a todas as fábricas de cimento destas regiões.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam a capacidade de utilização da biomassa de casca de café. coprocessamento sem prejuízo à qualidade de cimento produzido.

Quando analisamos os resultados de potencial de redução de custo com o a substituição de 15% do coque de petróleo pela casca de café e, supondo uma operação de 1000 toneladas de clínquer/dia, temos o potencial de economia de R\$ 6,06 milhões/ano e potencial de redução de 1,612 t de CO₂/t de coque de petróleo substituído.

REFERÊNCIAS

- A. A. DURÁN, C. *et al.* Coffee: General Aspects and its Use beyond Drink. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107–134, 2017.
- A. DA SILVA, D. *et al.* Effect of the Particle Size on Compaction of Elephant Grass Biomass. **Revista Virtual de Química**, p. 323–333, 2018.
- ABNT NBR 17054. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**, 2022.
- AMERICAN FUEL & PETROCHEMICAL MANUFACTURERS - AFPM. **Petroleum coke overview**. Disponível em: <<http://www.afpm.org/policy-position-petroleum-coke/>>. Acesso em: 1 abr. 2024.
- AMMENBERG, J. *et al.* Improving the CO₂ performance of cement, part III: The relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 145–155, 1 jul. 2015.
- ASAMANY, E. A.; GIBSON, M. D.; PEGG, M. J. Evaluating the potential of waste plastics as fuel in cement kilns using bench-scale emissions analysis. **Fuel**, v. 193, p. 178–186, 2017.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK. **Small Scale Clean Development Mechanism Project Handbook**. [s.l.] Asian Development Bank, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM DO BRASIL. **Manual do Concreto Dosado em Central**, 2022. Disponível em: <<https://www.abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do Coprocessamento - Uma tecnologia Sustentável**, 2022. Disponível em: <<https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2022/#:~:text=O%20Panorama%20do%20Coprocessamento%20%E2%80%93%20Brasil%202022%20%28Ano,volumes%20coprocessados%20pela%20ind%C3%BAstria%20do%20cimento%20em%202021.>>>. Acesso em: 19 dez. 2023
- _____. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/historia/>>. Acesso em: 18 dez. 2023a.
- _____. **Expectativas e perspectivas da indústria do cimento - PORTAL ABCP**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/expectativas-e-perspectivas-da-industria-do-cimento/>>. Acesso em: 18 dez. 2023b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos**, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11956. **Coque – Determinação do poder calorífico superior**, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência.**, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14832. **Cimento Portland e clínquer – Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo**, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14929. **Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método de secagem em estufa**, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16697. **Cimento Portland - Requisitos**, 2018. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL. **Biomassa**. Disponível em: <<https://alager.org.br/biomassa.html>>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- ASTM INTERNATIONAL - E872-82. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**. Disponível em: <<https://www.astm.org/e0872-82r19.html>>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- ASTM INTERNATIONAL - E1755-01. **Standard Test Method for Ash in Biomass**. Disponível em: <<https://www.astm.org/standards/e1755>>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Relatório final 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 24 jan. 2023a.
- _____. **Relatório Síntese 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 24 jan. 2023b.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Conversor de Moedas**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/conversao>>. Acesso em: 27 dez. 2023.
- BATTAGIN, A. F.; CARDOSO, F. D. Panorama do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento no Brasil. **60 Congresso Brasileiro do Concreto**, 2018.
- BAXTER, L. L. *et al.* The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1–3, p. 47–78, mar. 1998.
- BHATTY, J. I. **Effect of Minor Elements on Clinker and Cement**. Disponível em: <<https://www.cementequipment.org/cement-chemistry/effect-minor-elements-clinker-cement-javed-bhatty/>>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- BISWAS, S.; SHARMA, D. K. A review on the co-processing of biomass with other fuels sources. **International Journal of Green Energy**, v. 18, n. 8, p. 793–811, 2021.

- BLOTEVOGEL, S. *et al.* Effect of TiO₂ and 11 minor elements on the reactivity of ground-granulated blast-furnace slag in blended cements. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 104, n. 1, p. 128–139, 19 jan. 2021.
- BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n. 1/2, p. 27–32, 2008.
- CAMPOS, R. F. DE *et al.* Avaliação da decomposição térmica de espécies de bambu por termogravimetria. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 259, 21 fev. 2020.
- CANAVEIRA, P. Existe neutralidade de carbono no uso de biomassa para energia? **Pasta e Papel**, p. 32–36, 2015.
- CARVALHO, A.; VIDAL, F.; BARROS DA HORA, A. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, v. n° 33, p. 261–314, 2011.
- CEMENTEQUIPMENT.ORG. **Everything you need to know about Minor Elements in Cement Manufacturing**. Disponível em: <<https://www.cementequipment.org/home/everything-you-need-to-know-about-minor-elements-in-cement-manufacturing/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- CHINYAMA, M. P. M. Alternative Fuels in Cement Manufacturing. *Em: Alternative Fuel*. [s.l.] IntechOpen, 2011. .
- CHINYAMA, M. P. M.; LOCKWOOD, F. C. Devolatilisation behaviour of shredded tyre chips in combusting environment. **Journal of the Energy Institute**, v. 80, n. 3, p. 162–167, 1 set. 2007.
- CLERY, D. S. *et al.* The effects of an additive on the release of potassium in biomass combustion. **Fuel**, v. 214, p. 647–655, fev. 2018.
- COMÉRIO, L. *et al.* Casca do café para a geração de energia: caracterização da biomassa e análise dos gases de combustão. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2016.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_263.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Levantamento da Conab estima produção de café em 54,74 milhões de sacas na safra 2023**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5003-levantamento-da-conab-estima-producao-de-cafe-em-54-74-milhoes-de-sacas-na-safra-2023>>. Acesso em: 3 ago. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Indústria Brasileira de Cimento - Base para a construção do desenvolvimento**. Disponível em:

<https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA n° 264 Diário Oficial da União**, 2000.

_____. **CONAMA n° 499 Diário Oficial da União**, 2020. 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 dez. 2021

COPROCESSAMENTO.ORG. **Panorama do Coprocessamento - Brasil 2022 (Ano base 2021) - Coprocessamento**. Disponível em: <<https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2022/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

_____. **Panorama do Coprocessamento**. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_Coprocessamento_2023_Ano_Base_2022_dez2023.pdf>.

Acesso em: 22 fev. 2024.

CORDEIRO, L. DE N. P. *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 45–55, mar. 2019.

CORTADA MUT, M. D. M.; NØRSKOV, L. K.; GLARBORG, P.; *et al.* SO₂ release as a consequence of alternative fuel combustion in cement rotary kiln inlets. **Energy and Fuels**, v. 29, n. 4, p. 2729–2737, 16 abr. 2015.

CORTADA MUT, M. D. M.; NØRSKOV, L. K.; FRANDBSEN, F. J.; *et al.* Review: Circulation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants. **Energy and Fuels**, v. 29, n. 7, p. 4076–4099, 16 jul. 2015.

COSTA, E. B. DA *et al.* Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75–86, jun. 2013.

CREUTZBERG, R.; FERRARI, M. J.; ENGELAGE, E. Análise de Custos no Descarte de Resíduos Sólidos: Estudo de Caso em uma Empresa do Ramo Metal Mecânica. **V SINGEP - Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade**, 2016.

DAL-BÓ, V. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para geração de energia**. São Mateus, ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

_____. Process synthesis for coffee husks to energy using hierarchical approaches. **Renewable Energy**, v. 142, p. 195–206, 1 nov. 2019.

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

ESTADO DE SÃO PAULO. **Votorantim Cimentos anuncia metas de sustentabilidade e quer reduzir emissões em 12% até 2030 - Estadão**. Disponível em:

<<https://www.estadao.com.br/economia/governanca/votorantim-cimentos-anuncia-metas-de-sustentabilidade-e-quer-reduzir-emissoes-em-12-ate-2030/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

FARIAS, F. O. M. **Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 29 dez. 2012.

FERNANDES, A. **Avaliação do processo de combustão da biomassa (bagaço de cana) para valorização das cinzas geradas**. São Leopoldo, RS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 22 fev. 2019.

FERNANDES, I. J. *et al.* Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. **6 Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, 2015.

FILHO, R. A. D. M. **Viabilidade de queima de casca de eucalipto em fornos de cimento**. Sorocaba / SP: Universidade Federal de São Carlos, 2020.

FLSMIDTH. **Low NOX Calciner**. Disponível em: <<https://www.flsmidth-cement.com/products/flsmidth-low-nox-calciner>>. Acesso em: 16 ago. 2023a.

_____. **HOTDISC® Reactor**. Disponível em: <<https://www.flsmidth.com/en-gb/products/pyro/hotdisc-combustion-device>>. Acesso em: 15 ago. 2023b.

FURTADO, T. S. *et al.* Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101–106, 28 out. 2010.

GARCÍA, R. *et al.* Study of biomass combustion wastes. **Fuel**, v. 148, p. 152–159, 15 maio 2015.

_____. Biomass sources for thermal conversion. Techno-economical overview. **Fuel**, v. 195, p. 182–189, maio 2017.

GERASSIMIDOU, S. *et al.* Chlorine in waste-derived solid recovered fuel (SRF), co-combusted in cement kilns: A systematic review of sources, reactions, fate and implications. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 140–186, 2021.

GINEYS, N.; AOUAD, G.; DAMIDOT, D. Managing trace elements in Portland cement – Part I: Interactions between cement paste and heavy metals added during mixing as soluble salts. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 563–570, set. 2010.

_____. Managing trace elements in Portland cement – Part II: Comparison of two methods to incorporate Zn in a cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 629–636, jul. 2011.

- GREY, R. O.; BEDDOW, J. K. On the Hausner Ratio and its relationship to some properties of metal powders. **Powder Technology**, v. 2, n. 6, p. 323–326, set. 1969.
- 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.
- GUIA DA ENGENHARIA. **Cimento Portland: composição, definição e propriedades**. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/composicao-cimento-portland/>>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- HASANBEIGI, A.; PRICE, L.; LIN, E. Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 6220–6238, out. 2012.
- HASHEM, F. S.; RAZEK, T. A.; MASHOUT, H. A. Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 275–282, 10 jul. 2019.
- HASSAN, E. M.; STEELE, P. H.; INGRAM, L. Characterization of Fast Pyrolysis Bio-oils Produced from Pretreated Pine Wood. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 154, n. 1–3, p. 3–13, 3 maio 2009.
- HEMIDAT, S. *et al.* Potential utilization of RDF as an alternative fuel to be used in cement industry in Jordan. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 20, 1 out. 2019.
- HERMOSA, V. A. B. **Aproveitamento dos resíduos do processamento semi-seco do café para a produção de compostos de valor agregado**. Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, 2014.
- 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, 15 nov. 2016.
- HOSEINI, M. *et al.* Coffee by-products derived resources. A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, p. 106009, maio 2021.
- HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, maio 2009.
- IEA BIOENERGY. **Databases - Task32**. Disponível em: <<https://task32.ieabioenergy.com/databases/>>. Acesso em: 1 abr. 2024.
- IKN GMBH. **Preheater - IKN GmbH**. Disponível em: <<https://www.ikn.eu/preheater/>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Café no Brasil | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cafe/br>>. Acesso em: 26 dez. 2023a.

_____. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html>>. Acesso em: 11 ago. 2023b.

_____. **Inflação**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 18 fev. 2024c.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Low-Carbon transition in the cement industry**. Disponível em:

<<https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4586/61682/1>>. Acesso em: 14 nov. 2022.

INVESTING.COM. **Coque Futuro**. Disponível em:

<<https://br.investing.com/commodities/metallurgical-coke-futures>>. Acesso em: 18 fev. 2024.

ISHAK, S. A.; HASHIM, H. Low carbon measures for cement plant - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 260–274, 2015.

JENKINS, B. M. *et al.* Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1–3, p. 17–46, mar. 1998.

JINGJING, L. *et al.* Biomass energy in China and its potential. **Energy for Sustainable Development**, v. 5, n. 4, p. 66–80, dez. 2001.

JORAPUR, R.; RAJVANSHI, A. K. Sugarcane leaf-bagasse gasifiers for industrial heating applications. **Biomass and Bioenergy**, v. 13, n. 3, p. 141–146, jan. 1997.

JOSÉ CARVALHO, D. **Estudo da viabilidade técnica de sistemas de cogeração operando exclusivamente com palha de cana**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 25 fev. 2011.

KAUR, K.; KAUR, R.; KAUR, H. A systematic review of lignocellulosic biomass for remediation of environmental pollutants. **Applied Surface Science Advances**, v. 19, p. 100547, fev. 2024.

KIHARA, Y. Co-processamento de resíduos em fornos de cimento: Tendências. **II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**, 1999.

KOBYASHI, N. *et al.* The behavior of flue gas from RDF combustion in a fluidized bed. **Powder Technology**, v. 151, n. 1–3, p. 87–95, mar. 2005.

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. *et al.* A Evolução do Coprocessamento de Pneus Inservíveis no Brasil. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2016.
- LAMAS, W. D. Q.; PALAU, J. C. F.; CAMARGO, J. R. DE. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 200–207, 2013.
- LAMEIRAS, B. F. M. **Importância das características farmacotécnicas na preparação de formas farmacêuticas sólidas**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 13 dez. 2019.
- LARSEN, M. B. **Alternative fuels in Cement production**. Lyngby: Technical University of Denmark, 2007.
- LIMA, A. B. DE. **O processo produtivo do cimento Portland**. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- LIMA, E. A. DE; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. EMBRAPA - Comunicado Técnico, 2008.
- LIMA, F. S.; GOMES, T. C. F.; MORAES, J. C. B. DE. Novel one-part alkali-activated binder produced with coffee husk ash. **Materials Letters**, v. 313, p. 131733, abr. 2022.
- LIPPEL. **Cavacos de Madeira**. Disponível em: <<https://www.lippel.com.br/artigos-academicos/cavacos-de-madeira/>>. Acesso em: 5 abr. 2024.
- LUIS FRANCO JACOME, D. **Caracterização físico-química das cinzas da palha de cana-de-açúcar através de análises térmicas simultâneas (STA)**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 25 fev. 2014.
- 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.
- MAHASENAN, N.; SMITH, S.; HUMPHREYS, K. The Cement Industry and Global Climate Change Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions. *Em: Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference*. [s.l.] Elsevier, 2003. p. 995–1000.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 4, p. 339–352, out. 2004.
- MANSARAY, K. G.; GHALY, A. E. Physical and Thermochemical Properties of Rice Husk. **Energy Sources**, v. 19, n. 9, p. 989–1004, nov. 1997.
- MANTEGAZZA, E. **Aspectos ambientais do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2004.

- MANTUS, E. K. **All Fired Up: burning hazardous waste in cement kilns**. Seattle: Environmental Toxicology International (ETI), 1992.
- MARTINS, R. S. Estudo da formação do frete rodoviário e potencial de conflitos em negociações em cadeias do agronegócio brasileiro. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 73–87, 2008.
- MATSUDA, H. *et al.* Kinetics of HCl emission from inorganic chlorides in simulated municipal wastes incineration conditions. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 2, p. 545–552, jan. 2005.
- MCILVEEN-WRIGHT, D. R. *et al.* A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidised bed technologies. **Fuel**, v. 86, n. 14, p. 2032–2042, set. 2007.
- MENDEZ, M. O. A. **Síntese de materiais carbonosos ativados a partir de coque de petróleo**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 28 mar. 2005.
- MENDOZA MARTINEZ, C. L. *et al.* Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 123, p. 70–77, 1 abr. 2019.
- MEYSTRE, J. DE A. **Análise do coprocessamento de resíduo sólido urbano na indústria de cimento Portland no Brasil**. Itajubá, MG: Universidade Federal de Itajubá, 15 abr. 2016.
- MILENKOVA, K. S. *et al.* Devolatilisation behaviour of petroleum coke under pulverised fuel combustion conditions. **Fuel**, v. 82, n. 15–17, p. 1883–1891, out. 2003.
- MOIR, G. K.; GLASSER, F. P. Mineralizers, modifiers and activators in the clinkering process. **International Congress on the Chemistry of Cement**, v. 1, p. 125–152, 1992.
- MOKRZYCKI, E.; ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A. Alternative fuels for the cement industry. **Applied Energy**, v. 74, n. 1–2, p. 95–100, jan. 2003.
- MONTINI, M. **Aplicações de resíduo de bauxita e cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento Portland**. São Carlos / SP: Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- MURRAY, A.; PRICE, L. K. **Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector**. [s.l.] ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, jun. 2008. Disponível em: <<https://international.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement>>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. [s.l.] Editora Interciência, 2003. v. 1

- O ECO. **Caroços do açaí movem economias na Amazônia**. Disponível em: <https://oeco.org.br/reportagens/carocos-do-acai-movem-economias-na-amazonia/?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=email_this&utm_source=email>. Acesso em: 13 set. 2023.
- OLIVEIRA, F. A. C. *et al.* Portland cement clinker production using concentrated solar energy – A proof-of-concept approach. **Solar Energy**, v. 183, p. 677–688, 1 maio 2019.
- OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, 10 nov. 2020.
- PANDEY, A. *et al.* Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 153–162, out. 2000.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.; GHOSAL, G. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, mar. 2005.
- PASQUALI, R. B. *et al.* Utilização da casca de café como fonte de energia renovável na aciaria elétrica. **44º Seminário de Aciaria**, v. 44, p. 614–625, 2013.
- PREPARA ENEM. **O que é um calorímetro? Funcionamento de um calorímetro**. Disponível em: <<https://www.preparaenem.com/quimica/o-que-um-calorimetro.htm>>. Acesso em: 25 dez. 2023.
- PROTÁSIO, T. DE P. *et al.* Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273–283, 26 dez. 2011.
- PUERTAS, F.; BLANCO-VARELA, M. T. Empleo de combustibles alternativos en la fabricación de cemento. Efecto en las características y propiedades de los clínkeres y cementos. **Materiales de Construcción**, v. 54, n. 274, p. 51–64, 30 jun. 2004.
- RAHMAN, A. *et al.* Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, v. 145, p. 84–99, 1 abr. 2015.
- _____. Assessment of energy performance and emission control using alternative fuels in cement industry through a process model. **Energies**, v. 10, n. 12, 2017.
- RESOURCE MANAGEMENT BRANCH. **Composting Factsheet British Columbia Ministry of Agriculture Food and Fisheries Abbotsford British Columbia Ministry of Agriculture Food and Fisheries**, , 1996.
- ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO. **Potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050**. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em: 21 dez. 2021.

- 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**, v. 16, n. 1, p. 1–10, mar. 2011.
- RODRIGUES, D. S. *et al.* Análise imediata de biomassas agrícolas: um estudo comparativo. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC**, 2019.
- RODRIGUES, F. A.; JOEKES, I. Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. **Environmental Chemistry Letters**, v. 9, n. 2, p. 151–166, 23 jun. 2011.
- RUOZZI, A. *et al.* Cold-end corrosion in biomass combustion – Role of calcium chloride in the deposit. **Fuel**, v. 349, p. 128344, out. 2023.
- S. HANSTED, A. L. *et al.* Physico-Chemical Characterization of *Leucaena leucocephala* Biomass for Solid-Fuel Production. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1449–1460, 2016.
- SAENGER, M. *et al.* Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, v. 23, n. 1, p. 103–121, 1 maio 2001.
- SANTOS, A. R. **A Geração de Coque de Petróleo Devido ao Processamento de Petróleos Pesados e o Seu Uso na Produção de Clínquer de Cimento Portland**. Itajubá, MG: Universidade Federal de Itajubá, set. 2007.
- SAVEYN, H. *et al.* **Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy**, 2016.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.
- 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.
- SILVA, D. A. *et al.* Caracterização de biomassas para a briquetagem. **FLORESTA**, v. 45, n. 4, p. 713, 9 set. 2015.
- SILVA, J. P. DA. **Caracterização da casca de café (coffea arábica, L) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 24 fev. 2012.
- SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1091–1099, dez. 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. São Paulo, SP: [s.n.]. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2023.

____. **SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em:

<<http://snic.org.br/index.php>>. Acesso em: 15 dez. 2023a.

____. **História**. Disponível em: <<http://snic.org.br/historia.php>>. Acesso em: 18 dez. 2023b.

____. **Dados do Setor**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 25 dez. 2023c.

SINGER, J. G. **Combustion fossil power systems: a reference book on fuel burning and steam generation**. 4th Edition ed. [s.l.] Combustion Engineering Power Systems Group, 1993.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em:

<<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

SOARES, M. G.; CAIXETA FILHO, J. V. Caracterização do mercado de fretes rodoviários para produtos agrícolas. **Gestão & Produção**, v. 4, n. 2, p. 186–204, ago. 1997.

SOCCOL, C. R. Resíduo de café: um substrato promissor para a produção industrial de bioprodutos com alto valor agregado. **I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, p. 83–98, 2002.

SOGA, R. *et al.* Effect of minor element on clinker mineral and cement hydrarion. **Cement Science and Concrete Technology**, v. 71, n. 1, p. 32–39, 2017.

SOUSA DIAS, J. M. C. DE *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. [s.l.] Embrapa Agroenergia, 2012.

SOUZA, C. D. R. DE; D'AGOSTO, M. D. A. Análise dos Custos Logísticos Aplicada à Cadeia Logística Reversa do Pneu Inservível. **TRANSPORTES**, v. 21, n. 2, p. 38, 31 ago. 2013.

SOUZA, F. DE; VALE, A. T. DO. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405, 11 jan. 2017.

STATISTA. **Major countries in worldwide cement production in 2023**. Disponível em:

<<https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/#:~:text=China%20produces%20the%20most%20cement%20globally%20by%20a,a%20distant%20370%20million%20metric%20tons%20in%202022.>>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

STENSENG, M. **Pyrolysis and Combustion of Biomass**. Lyngby: Technical University of Denmark, 2001.

SUPRIYA *et al.* Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector.

Journal of Cleaner Production, v. 417, p. 137466, set. 2023.

SWITHENBANK, J. *et al.* Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 3, p. 999–1007, mar. 2011.

TOKHEIM, L.-A. **The impact of staged combustion on the operation of a precalciner cement kiln**. Porsgrunn: Telemark University College, 1999.

TOMELERI, J. O. P. **Viabilidade técnica e econômica da recuperação energética da biomassa residual da extração do óleo de melaleuca**. Sorocaba, SP: Universidade Federal de São Carlos, 2023.

TORRES, V. A.; LANGE, L. C. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valorização energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 25–30, fev. 2022.

TSUBOUCHI, N. *et al.* Formation of Hydrogen Chloride during Temperature-Programmed Pyrolysis of Coals with Different Ranks. **Energy & Fuels**, v. 19, n. 2, p. 554–560, 1 mar. 2005.

UFSC. **Cimento**. Disponível em: <<https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/cimento/>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Hydrogen and Fuel Cells Program: Lower and higher heating values of hydrogen and fuels**. Disponível em: <<http://hydrogen.pnl.gov/>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

VALE, A. T. DO *et al.* Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*coffea arábica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), DUKE. **Cerne, Lavras**, v. 13, n. 4, p. 416–420, 2007.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, maio 2010.

VEGRO, C. L. R.; CARVALHO, F. C. DE. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café** Instituto de Economia Agrícola, 1994.

VERDERA SOLUTIONS. **Coprocessamento**. Disponível em:

<<https://www.verderasolutions.com.br/coprocessamento/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 24 jan. 2012.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Environmental Product Declaration for Cement CP V ARI**. Disponível em: <<https://www.environdec.com/library/epd897>>. Acesso em: 12 jul. 2023a.

_____. **Environmental Product Declaration for Cement CP III 40 RS**. Disponível em: <<https://www.environdec.com/library/epd897>>. Acesso em: 12 jul. 2023b.

_____. **Babaçu em Sobral – Nossos esforços, nossos resultados**. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/estudo-de-caso/babacu-em-sobral-nossos-esforcos-nossos-resultados/>>. Acesso em: 19 dez. 2023c.

_____. **O coprocessamento de resíduos na construção de um mundo feito para durar**. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/o-coprocessamento-de-residuos-na-construcao-de-um-mundo-feito-para-durar/>>. Acesso em: 19 dez. 2023d.

WBCSD. **Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing**. Disponível em: <https://docs.wbcsd.org/2015/10/CSI_Co-Processing_Fuels_and_Raw_Materials.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2022.

_____. **Cement technology roadmap**. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso em: 31 mar. 2024.

WOJTACHA-RYCHTER, K.; KUCHARSKI, P.; SMOLINSKI, A. Conventional and alternative sources of thermal energy in the production of cement—an impact on co2 emission. **Energies**, v. 14, n. 6, 2 mar. 2021.

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, nov. 2001.

WRAP. **A classification scheme to define the quality of waste derived fuels**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/document/view/31351979/wdf-classification-scheme-wrap>>.

XU, G.; LI, M.; LU, P. Experimental investigation on flow properties of different biomass and torrefied biomass powders. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 63–75, mar. 2019.