



UNIDADE INTEGRADA Sesi/SENAI CARLOS GUIDO FERRARIO LOBO

MARIA CLARA LIRA DE MELO

MATHEUS PEREIRA DE LIMA

MILLENA TELES PITA VANDERLEI MELO

CLIMPLENT:

COMPOSTO DE BIOMASSAS PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO

MACEIÓ-AL

2025



Maria Clara Lira De Melo

Matheus Pereira De Lima

Millena Teles Pita Vanderlei Melo

CLIMPLENT:

COMPOSTO DE BIOMASSAS PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO

Relatório apresentado à 9ªFEMIC - Feira Mineira
de Iniciação Científica.

Orientadora: Profa. Francisca Nogueira Martins

MACEIÓ - AL

2025



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
2	JUSTIFICATIVA.....	7
3	OBJETIVOS.....	9
3.1	Objetivo geral.....	9
3.2	Objetivos específicos.....	9
4	METODOLOGIA.....	10
4.1	Preparação da matéria-prima.....	10
4.2	Análise química.....	11
4.3	Análise física.....	11
5	RESULTADOS	12
5.1	Obtenção e tratamento inicial da matéria-prima para análise	12
5.2	Análise EDX: composição elementar das amostras de biomassas e clínquer	14
5.3	Análise comparativa dos espectros FT-IR: amostras das biomassas e clínquer.....	17
5.4	Formulações: Amostras das biomassas e clínquer.....	21
5.5	Análise física do Cimplent incorporada ao clínquer: avaliação da granulometria e consistência normal.....	26
5.6	Cimplent como alternativa ao clínquer: classificação com base na análise EDX e comparação com cimentos convencionais.....	30
5.7	Economia circular e sustentabilidade na indústria cimenteira: análise da viabilidade econômica do Cimplent como alternativa ao clínquer.....	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
	REFERÊNCIAS.....	38



RESUMO

A indústria cimenteira desempenha papel fundamental no desenvolvimento global, porém apresenta impactos ambientais significativos, como elevadas emissões de CO₂ e consumo excessivo de recursos naturais. A busca por soluções sustentáveis impulsiona pesquisas voltadas à redução do teor de clínquer no cimento. Este estudo teve como objetivo desenvolver um composto de biomassas para produção de cimento, promovendo sustentabilidade e ganhos econômicos. Utilizaram-se bagaço de cana-de-açúcar, fibras de bambu, casca de mandioca e casca do arroz, cujas composições químicas assemelham-se à do clínquer. As biomassas foram caracterizadas por EDX e FT-IR, revelando composição química, estrutura e propriedades compatíveis, e por análises físicas de consistência e granulometria. O arroz carbonizado apresentou 76,8% de silício; o bambu, 48,5% de cálcio; e a mandioca, 46,7% de potássio. A formulação mais promissora foi composta por 48% de clínquer, 50% de Climplent e 2% de gesso, priorizando bambu e arroz carbonizado. Ensaio físicos, conforme a NBR NM 43, com amostra de 500 g e peneira de 0,075 mm, indicaram consistência adequada (6±1 mm). Observou-se necessidade de nova análise EDX considerando Climplent e clínquer em conjunto. Os resultados sugerem que a mistura se enquadraria no cimento CP IV, demandando confirmações adicionais. Futuramente, serão realizados ensaios físico-mecânicos para determinar a resistência à compressão do cimento Portland e testes com adição de sílica ativa, avaliando a redução no teor de água. Tais ações poderão ampliar a descarbonização no setor cimenteiro.

Palavras-chave: Cimento sustentável. Biomassas. Descarbonização

1 INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira desempenha um papel crucial no desenvolvimento da infraestrutura global. No entanto, historicamente, tem sido associada a impactos ambientais significativos, incluindo emissões de carbono e consumo excessivo de recursos naturais, contribuindo com aproximadamente 3% das emissões totais de gases de efeito estufa e cerca de 5% das emissões de CO₂ (Prado *et al.*, 2022).

Nosso objeto de estudo – o cimento – é uma substância granulada formada pela combinação de silicatos e aluminatos de cálcio. Esses compostos são obtidos por meio da calcinação dos materiais necessários, esses incluem fontes de cálcio, alumínio e ferro. Quando essa mistura é adicionada à água, ocorre um processo de hidratação, resultando no endurecimento do material (Cardoso, 2020).

Conforme discorre Castro (2020), os silicatos de cálcio (SiO₂), os principais componentes do cimento, têm a responsabilidade de resistência do material e, quando hidratados, formam cristais amplamente resistentes. Já o aluminato de cálcio (AlO₂) é responsável pelo endurecimento do cimento e, quando misturado com água, ajuda a formar a estrutura inicial, dando força para a mistura (Cruz; Santos, 2014).

Além dos dois supracitados, há também na composição a presença do ferro (Fe), ele não desempenha papel de extrema importância em relação aos outros, entretanto ajuda a dar maior estabilidade à composição e a melhorar a resistência do produto final (Grotto, 2010).

As substâncias químicas mencionadas acima são essenciais para a qualidade do produto final e são encontradas predominantemente no clínquer, que é o resultado da calcinação, uma reação química de decomposição térmica responsável por sua formação.

No que se refere ao clínquer, ele é um material de granulometria rígida, composto por calcário e argila, obtido através do processamento das matérias-primas em fornos rotativos. De acordo com Cardoso (2020), a fabricação do clínquer é um processo desafiador que exige temperaturas entre 1450°C e 1550°C. Além de ser o principal componente do cimento, ele também é o material cuja produção emite a maior quantidade de CO₂ na indústria cimenteira.

Conforme apontado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a busca por soluções que equilibrem eficiência produtiva e responsabilidade ecológica é crucial para

as indústrias, não apenas como uma resposta às demandas do mercado e às regulamentações ambientais, mas também como uma oportunidade de contribuir para a preservação do meio ambiente. Essa abordagem deve focar em dois aspectos principais: a redução das emissões de gases de efeito estufa e a promoção de cadeias produtivas circulares.

De acordo com o Sindicato Nacional dos Docentes das Instituições de Ensino Superior (ANDES), o Brasil, sendo um dos principais emissores de gases de efeito estufa, necessita realizar mudanças significativas em suas políticas ambientais. O Observatório do Clima estabeleceu uma meta ambiciosa de reduzir as emissões em 92% até 2035, com base nos níveis de 2005. Essa redução é fundamental para conter o aumento da temperatura global a 1,5°C, conforme as diretrizes do Acordo de Paris.

Diante desse contexto, a pesquisa surge com a seguinte pergunta geradora: é possível desenvolver um produto que substitui, parcialmente, o clínquer, promovendo a sustentabilidade, diversificando a cadeia produtiva e adotando uma abordagem de economia circular?

Uma proposta para abordar essa questão é investigar a viabilidade de um composto de biomassas derivado de fontes orgânicas que possa substituir, em parte, o clínquer. As hipóteses centrais da pesquisa são:

- a) O composto de biomassas derivado de fontes orgânicas, desenvolvido para a produção de cimento, terá uma composição química que se assemelha à do clínquer, incluindo proporções adequadas de sílica, alumina, cal e óxido de ferro.
- b) A consistência e granulometria do composto de biomassas são semelhantes às do cimento tradicional, proporcionando sua capacidade de solidificação e velocidade de hidratação de forma compatível.
- c) A incorporação do composto de biomassas na produção de cimento resultará em produtos finais com propriedades físicas e químicas satisfatórias, capazes de atender aos padrões de qualidade exigidos pela indústria da construção civil.
- d) A utilização do composto de biomassas na fabricação de cimento promoverá benefícios econômicos significativos para a indústria cimenteira, reduzindo os custos de produção e contribuindo para uma abordagem mais sustentável e consciente em termos de impacto ambiental.

2 JUSTIFICATIVA

Os impactos negativos da produção do cimento no meio ambiente são de particular preocupação. Principalmente, no que se refere a sua importância nas atividades de construção civil, a tendência de crescimento populacional e desenvolvimento urbano, fatores que impulsionam ainda mais a demanda por esse material (Gates, 2021). Durante o Fórum Econômico Mundial de 2023, sediado em Davos, na Suíça, foram abordadas as perspectivas futuras da indústria do cimento e do concreto, visando promover a descarbonização nesses setores. Entre as propostas debatidas para incentivar a produção sustentável de materiais destaca-se, principalmente, a redução da proporção de clínquer na composição do cimento.

A fabricação de clínquer implica um elevado consumo energético e uma considerável emissão de dióxido de carbono na atmosfera, decorrente da queima de argila e calcário. Segundo Vasconcelos (2013), ao substituir parte desses elementos, não apenas há vantagens econômicas, mas também uma série de benefícios ambientais.

Com o intuito de promover a sustentabilidade ambiental, diversificar a cadeia produtiva e adotar uma abordagem de economia circular, surge o Climplet, um composto de biomassa constituído por bagaço de cana-de-açúcar, fibras de bambu, casca de mandioca e fibras de arroz que será desenvolvido para ser integrado à fabricação de cimento, com o propósito de reduzir a quantidade de clínquer utilizada no processo.

Nesse sentido, a seleção criteriosa das matérias-primas configura-se como uma etapa determinante no processo de produção, uma vez que deve assegurar não apenas a essencialidade e a qualidade técnica dos insumos, mas também sua compatibilidade com a disponibilidade regional de recursos, favorecendo a adaptabilidade e a acessibilidade da solução proposta, sem, contudo, incorrer em novos impactos ambientais.

De acordo com Vasconcelos (2013), uma das matérias orgânicas mais utilizadas na construção civil é o bagaço de cana-de-açúcar, um subproduto da produção de cana-de-açúcar, é frequentemente empregado na produção de energia. Durante o processo de queima, é gerada uma considerável quantidade de cinzas compostas principalmente por sílica, com aproximadamente 98% da massa, além de pequenas proporções de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e outros óxidos.

As cinzas produzidas, conforme explica Valentin (2020), atendem às características químicas necessárias para a produção de materiais cimentícios sustentáveis e promovem melhoria na qualidade da mistura, refinando os poros e reduzindo a vulnerabilidade a agentes externos, o que fortalece sua propriedade pozolânica¹, essencial para a durabilidade e resistência do concreto.

Outra matéria orgânica com alto destaque na construção civil é a casca de mandioca, rica em amido, que pode ser convertida em cimento de amido através de um processo que envolve a queima para produção de cinzas. Estas cinzas, quando misturadas com água e, posteriormente, secas e moídas, resultam em um cimento de amido (Guimarães, 2017).

Seguindo essa mesma concepção, a casca, subproduto da produção de arroz, é amplamente empregada em diversas aplicações, incluindo a produção de papel e plásticos biodegradáveis e o reforço de concreto na construção civil. Segundo Pereira *et al.* (2021), para cada tonelada de arroz em casca, 23% correspondem à casca e 4% correspondem a cinzas, que apresentam alta quantidade de sílica e são consideradas super pozolanas.

O bambu, material versátil e amplamente utilizado na construção civil, é outro produto que possui longas fibras e alta resistência. Conforme observado por Mendonça (2018), a sílica – um de seus componentes inorgânicos – está presente, principalmente, na epiderme, sendo composta por pequenos cristais de dióxido de silício concentrados principalmente nas células epidérmicas menores e nas partes externas dos colmos. A obtenção da sílica do bambu é realizada através da queima, convertendo-o em cinzas para uso posterior.

Ao utilizar, em sua grande maioria, resíduos agrícolas que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente no meio ambiente ou empregados em atividades de menor importância, será possível dar a esses materiais uma nova finalidade, completando o ciclo de vida dos recursos e promovendo a economia circular. Esse processo não apenas reduz o desperdício, mas também minimiza os impactos ambientais, agregando valor aos subprodutos e contribuindo para uma cadeia produtiva mais sustentável e eficiente.

As matérias-primas mencionadas anteriormente apresentam, em sua composição química, elementos semelhantes aos do clínquer do cimento portland. O clínquer composto, principalmente, por silicatos de cálcio e aluminatos (C_2S), (C_3S), (C_3A) e (C_4AF), formados através de reações químicas de altas temperaturas entre dióxido de silício (SiO_2), 16%-26%;

¹ Materiais produzidos industrialmente ou derivados de cinzas volantes de processos de queima industrial.

óxido de alumínio (Al_2O_3), 4%-8%; óxido de cálcio (CaO), 58%-67%, e óxido de ferro (Fe_2O_3), em cerca de 2%-5% (Centourine, 1999).

Para garantir a futura comercialização do climplent, é crucial demonstrar a disponibilidade de matéria-prima para atender à demanda do mercado. Por exemplo, o Brasil possui uma vasta diversidade de espécies de bambu lenhoso, representando 81% dos gêneros encontrados nas Américas. Todavia, sua exploração ainda é limitada em relação à versatilidade. Ademais, segundo o Instituto de Economia Agrícola (IEA), o País é o 9º maior produtor mundial de arroz e o maior produtor global de cana-de-açúcar. Em relação à produção de mandioca, o levantamento mais recente do IBGE indica que, na safra de 2023/2024, foram registrados 3,69 milhões de toneladas.

Com base no exposto, podemos afirmar que o climplent tem potencial para se consolidar no mercado, além de estar plenamente alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nosso produto contribui para oito dos 18 ODS estabelecidas: ODS 3 - Saúde e Bem-Estar; ODS 8 - Trabalho decente e crescimento econômico; ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura; ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis; ODS 12 - Consumo e Produção Sustentáveis; ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima; ODS 15 - Vida terrestre; ODS 17 - Parcerias e meios de implementação.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver um composto de biomassas para a produção de cimento, visando à promoção da sustentabilidade na indústria cimenteira e alcance de ganhos econômicos por meio de uma produção consciente e de baixo impacto ambiental.

3.2 Objetivos específicos

a) Realizar análises químicas do composto de biomassas para identificar sua composição em elementos como sílica, alumina, cal e óxido de ferro, com o intuito de assegurar que suas

características químicas sejam comparáveis às do clínquer, o principal componente do cimento convencional;

b) Analisar se esse composto de biomassas apresenta consistência e granulometria semelhantes às do cimento tradicional, a fim de garantir capacidade de solidificação e velocidade de hidratação de forma adequada.

4 METODOLOGIA

Como já mencionado, o climplent é um composto de biomassas que pode ser integrado à fabricação do cimento, visando promover a redução da quantidade de clínquer utilizada no processo. Para assegurar sua incorporação na composição, será necessário que o produto apresente características químicas do clínquer e características físicas do cimento.

Por meio de um estudo bibliográfico detalhado, foi possível assegurar, além da disponibilidade, o desempenho técnico e o impacto ambiental de matérias-primas como bagaço de cana-de-açúcar, fibras de bambu, casca de mandioca e fibras de arroz, que apresentam os principais elementos químicos do clínquer, como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), cal (CaO) e óxidos de ferro (Fe_2O_3).

4.1 Preparação da matéria-prima

Após a aquisição das biomassas junto aos respectivos fornecedores, iniciou-se a etapa de preparo dos materiais, essencial para a continuidade das análises. A casca de mandioca foi submetida à secagem natural sob radiação solar direta e, posteriormente, calcinada em temperaturas controladas entre 150°C e 350°C . O bagaço de cana-de-açúcar e o bambu foram incinerados separadamente a 600°C , com o objetivo de obtenção de cinzas com características pozolânicas adequadas.

Em seguida, a casca de arroz foi triturada, moída e peneirada até a obtenção de um pó fino, conforme metodologia proposta por Cordeiro (2009). As amostras oriundas das etapas de calcinação, trituração e moagem foram devidamente identificadas, armazenadas em recipientes hermeticamente vedados e acondicionadas em dessecador, visando à preservação de suas propriedades físico-químicas.

4.2 Análise química

Após a preparação das amostras derivadas de fontes orgânicas, avançamos para a realização dos testes químicos. As amostras dos quatro componentes de biomassa foram preparadas separadamente, junto com uma amostra do clínquer obtido junto a empresa Votorantim.

A razão para esse procedimento é assegurar um controle preciso da presença dos elementos químicos mais abundantes, garantindo, assim, uma proporção adequada de cada elemento no produto final. Para a caracterização química da amostra, serão consideradas as seguintes análises: EDX (Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva) e FT-IR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier).

Segundo Rodrigues *et al.*, (2017) o EDX permite determinar a composição química elementar da amostra, identificando e quantificando os elementos presentes, enquanto o FT-IR é amplamente usado para identificar a presença de grupos específicos em compostos orgânicos e inorgânicos. Cada grupo funcional possui uma assinatura única de absorção no espectro infravermelho, permitindo a identificação de compostos desconhecidos (Thaian, 2022).

As duas análises complementares fornecem informações sobre a composição química, estrutura e propriedades da amostra, permitindo uma caracterização abrangente.

4.3 Análise física

Além de assegurar propriedades químicas semelhantes ao clínquer, é fundamental que esse novo composto de biomassa apresente características físicas comparáveis ao cimento. Portanto, realizaremos testes de consistência e granulometria.

Segundo Borja (2013), para garantir a uniformidade na execução dos ensaios e a comparabilidade dos resultados entre todos os tipos de cimento, é essencial que as pastas de cimento tenham características idênticas. Como o objetivo é termos um composto semelhante ao tradicional cimento portland, utilizaremos como teste de consistência o ensaio de penetração com a sonda de Tetmajer, optando por simplicidade e rapidez no processo.

A pasta de consistência normal é uma combinação de cimento e água. Segundo Borja (2013), ela é preparada numa proporção resultando em índice de consistência de 6 ± 1^2 mm, conforme determinado pelo ensaio de consistência normal utilizando a sonda de Tetmajer. Se as leituras estiverem além da faixa de 6 ± 1 mm, é preciso ajustar a quantidade de água.

Em nenhuma circunstância é aceitável reutilizar ou repetir medições de consistência para a mesma pasta. A finura do cimento é determinada pelo índice de finura, que representa a porcentagem, calculada até os décimos, do material retido na peneira ABNT de 0,075 mm em relação à massa total da amostra no ensaio (Borja, 2013).

5 RESULTADOS

5.1 Obtenção e tratamento inicial da matéria-prima para análise

Para desenvolver um composto a partir de biomassas para a produção de cimento, com o objetivo de promover a sustentabilidade na indústria cimenteira, iniciamos a fase de testes. A primeira etapa consistiu na obtenção da matéria-prima. Com os materiais em mãos, passamos a transformá-los em cinzas utilizando uma mufla. Antes de colocarmos as amostras na mufla, pesamos cada uma em uma balança semi-analítica.

De acordo com a literatura, esperava-se que as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e do bambu fossem submetidas a uma temperatura de 600°C . No entanto, na prática, percebemos que a temperatura de 500°C foi suficiente para obtermos os resultados desejados. Além disso, a temperatura definida para obter as cinzas da mandioca também mudou. Constatamos que 150°C , como mencionado anteriormente, não seria suficiente para obter as cinzas, apenas para desidratar. Assim, as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, da casca da mandioca e do bambu foram obtidas a uma temperatura de 500°C durante um período de calcinação de aproximadamente 35 minutos.

² Significa que o índice de consistência da substância é de 6 milímetros, com uma variação aceitável de mais ou menos 1 milímetro.

Figura 1 a 4 - Etapas da preparação das biomassas – pesagem e calcinação



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Além da mudança de temperatura, outro fator que foi alterado foi o método de obtenção do pó da casca de arroz. Inicialmente, esperava-se obtê-lo apenas por moagem. Contudo, também incluímos na análise o pó de arroz carbonizado a uma temperatura de 280°C por 30 minutos. Após a obtenção das amostras, realizamos um teste de pH nas matérias onde elas apresentaram um pH neutro, ou seja, um grau de acidez abaixo de 7. Isso é importante para assegurar uma boa recuperação dos íons do composto, garantindo assim a qualidade dos compostos e uma mistura adequada (Queiroz *et al.*, 2022).

As tabelas a seguir apresentam informações sobre a temperatura, bem como o peso e a redução das matérias orgânicas.

Tabela 1- Temperatura utilizada

MATERIAL ORGÂNICO	TEMPERATURA ESPERADA	TEMPERATURA UTILIZADA
Pó da casca do arroz	...	...
Pó da casca do arroz carbonizada	...	280° C
Cinza da casca da mandioca	150 ° a 350 ° C	500 ° C
Cinza da fibra do bambu	600 ° C	500 ° C
Cinza do bagaço da cana de açúcar	600 ° C	500 ° C

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 2 - Processo de pesagem

MATERIAL ORGÂNICO	PESO - ANTES DA CALCINAÇÃO	PESO - DEPOIS DA CALCINAÇÃO	PORCENTAGEM DE REDUÇÃO
Casca do arroz	...	...	...
Casca da mandioca	20g	1,250 g	93,7%
Fibra do bambu	5 g	0,224 g	95,52%
Bagaço da cana de açúcar	10 g	0,249 g	97,51%

Fonte: Elaborada pelos autores.

As amostras provenientes das matérias-primas, juntamente com uma amostra do Clínquer foram encaminhadas para análise por meio de EDX (Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva) na Universidade Federal de Alagoas (UFAL). A análise inicial utilizando a técnica de EDX foi prioritária entre as quatro análises químicas planejadas, pois permite determinar a composição química elementar da amostra, identificando e quantificando os elementos presentes. Essa etapa inicial é crucial para compreender a composição das matérias orgânicas utilizadas e se a caracterização química se assemelham às do clínquer.

Figura 5 - Amostras das biomassas – cinza da casca de mandioca, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, arroz triturado, arroz carbonizado e clínquer



Fonte: Elaborada pelos autores.

5.2 Análise EDX: composição elementar das amostras de biomassas e clínquer

Neste primeiro momento, a análise de EDX permitiu entender a composição elementar das amostras, verificando a presença dos principais componentes químicos do clínquer e identificando a relevância de cada elemento para a fabricação de cimento. Assim, foi possível

observar uma composição química diversificada, com potencial para influenciar as propriedades do cimento resultante.

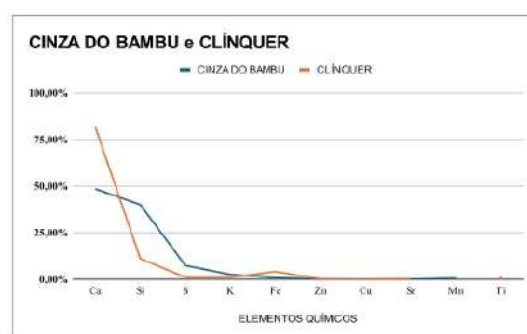
O silício (Si), elemento chave para a resistência e durabilidade do cimento, apresentou alta concentração no arroz carbonizado (76,808%) e no arroz em pó (65,956%), sugerindo seu potencial como fonte alternativa. O cálcio (Ca), essencial para a formação de compostos cimentícios, foi predominante no bambu (48,497%) e na cana-de-açúcar (38,191%), indicando a possibilidade de substituição parcial do calcário tradicionalmente utilizado.

O potássio (K), abundante na mandioca (46,711%), pode desempenhar papel relevante na reatividade e hidratação do cimento. Outros elementos como ferro (Fe), estrôncio (Sr), enxofre (S), cobre (Cu), zinco (Zn) e Titânio (T), embora em menor quantidade, podem influenciar propriedades como tempo de pega e resistência. A presença de elementos como fósforo (P), manganês (Mn) e alumínio (Al) também foi observada, sugerindo potencial impacto, ainda que sutil, nas características do cimento (Souza; Borges, 2011).

A presença e compatibilidade desses elementos asseguram a formação adequada dos novos agrupamentos químicos necessários para produzir um clínquer de alta qualidade. Compreendendo detalhadamente a composição química do clínquer e as origens dos óxidos, identificamos a viabilidade de explorar e validar materiais alternativos como substitutos no processo de fabricação do cimento, promovendo uma produção mais sustentável e econômica. Nos dados abaixo, podemos comparar os elementos químicos encontrados em cada amostra com os presentes no clínquer.

Figuras 6 e 7- Resultados da Análise do EDX-720 para a cinza do bambu e clínquer

ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	CINZA DO BAMBU	CLÍNQUER
Ca	48,50%	81,95%
Si	40,03%	11,04%
S	7,35%	1,05%
K	2,55%	1,07%
Fe	0,76%	4,11%
Zn	0,15%	0,08%
Cu	0,10%	0,07%
Sr	0,03%	0,29%
Mn	0,53%	---
Ti	---	0,35%

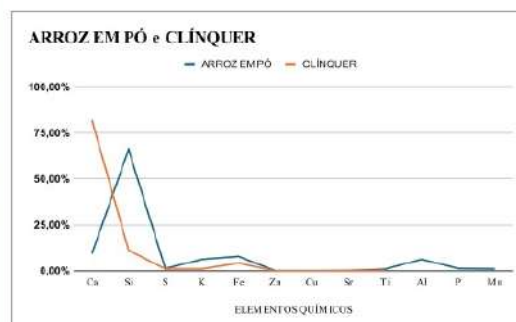


Fonte: Elaboradas pelos autores.



Figuras 8 e 9 - Resultados da Análise do EDX-720 para arroz em pó e clínquer

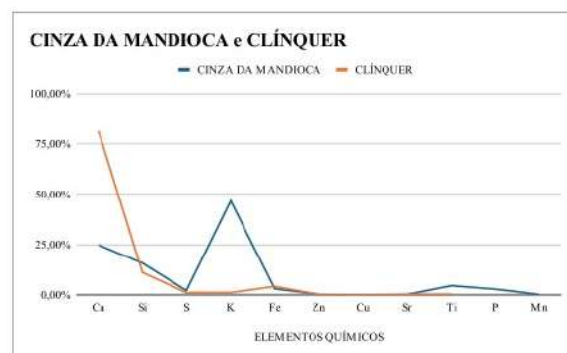
ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	ARROZ EM PÓ	CLÍNQUER
Ca	9,30%	81,95%
Si	65,96%	11,04%
S	1,19%	1,05%
K	6,20%	1,07%
Fe	7,73%	4,11%
Zn	0,07%	0,08%
Cu	0,07%	0,07%
Sr	0,01%	0,29%
Ti	0,04%	0,35%
Al	6,17%	...
P	1,30%	...
Mn	1,07%	...



Fonte: Elaboradas pelos autores.

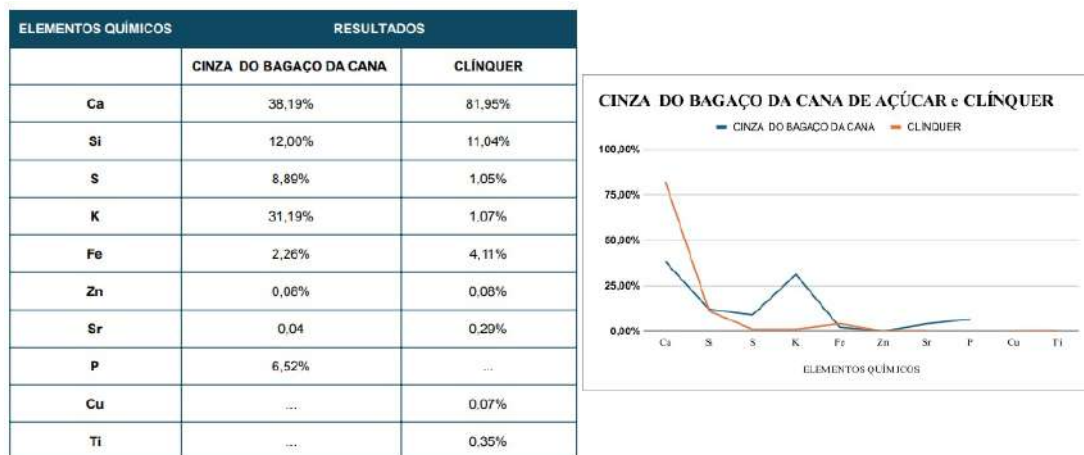
Figuras 10 e 11 - Resultados da Análise do EDX-720 para cinza da mandioca e clínquer

ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	CINZA DA MANDIOCA	CLÍNQUER
Ca	24,82%	81,95%
Si	15,69%	11,04%
S	2,08%	1,05%
K	46,71%	1,07%
Fe	3,00%	4,11%
Zn	0,19%	0,08%
Cu	0,05%	0,07%
Sr	0,13%	0,29%
Ti	4,51%	0,35%
P	2,78%	...
Mn	0,13%	...



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Figuras 12 e 13 - Resultados da Análise do EDX-720 para a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e clínquer



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Figuras 14 e 15 - Resultados da Análise do EDX-720 para arroz carbonizado e clínquer



Fonte: Elaboradas pelos autores.

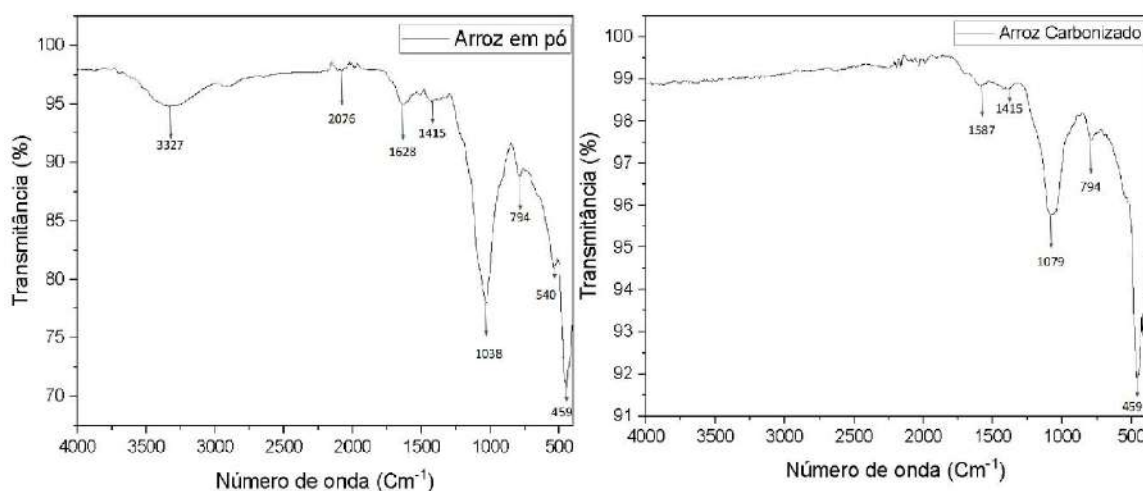
5.3 Análise Comparativa dos Espectros FT-IR: amostras das biomassas e clínquer

A análise dos espectros FT-IR foi realizada com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes no clínquer e compará-los com as biomassas utilizadas. Os espectros

obtidos revelaram padrões de absorção semelhantes, sugerindo a presença de grupos funcionais comuns entre as amostras.

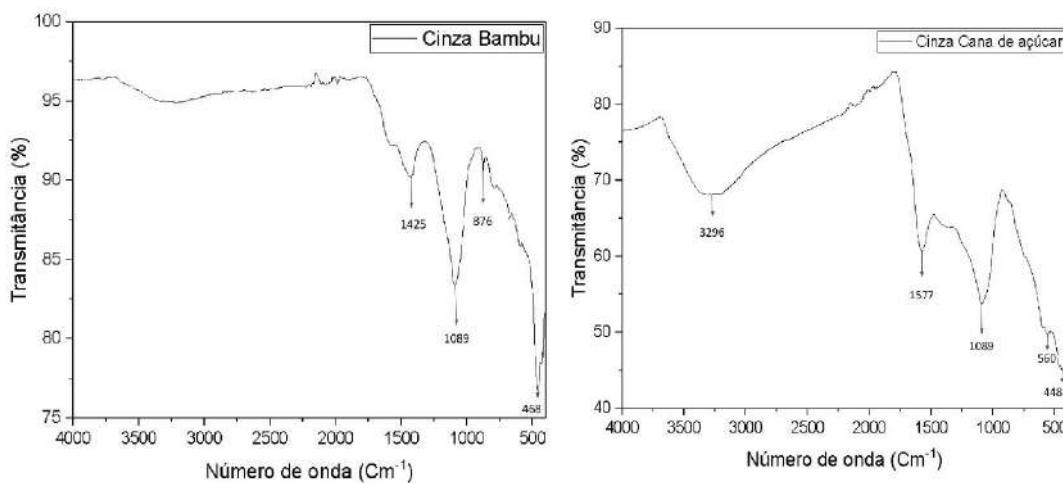
Essa correspondência entre os picos de absorção confirma semelhanças na composição química, permitindo uma caracterização mais detalhada do clínquer em relação aos outros materiais analisados. Nos gráficos abaixo, podemos observar os espectros de FT-IR de todas as amostras analisadas.

Figuras 16 e 17 - Espectro de FT-IR para as amostras de arroz em pó e arroz carbonizado



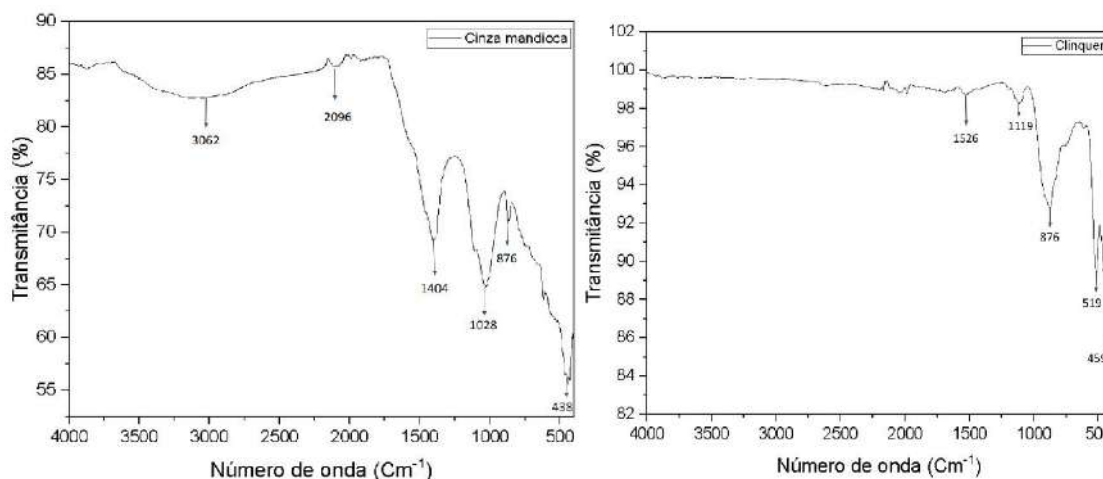
Fonte: Elaboradas pelos autores.

Figuras 18 e 19 - Espectro de FT-IR para as amostras de cinza do bambu e cinza da cana de açúcar



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Figuras 20 e 21 - Espectro de FT-IR para as amostras de clínquer e cinza da mandioca



Fonte: Elaboradas pelos autores.

É possível identificar várias bandas de absorção no clínquer e nos materiais de referência como arroz carbonizado e as cinzas da mandioca, cana-de-açúcar e bambu. A partir dessas bandas, foi possível identificar compostos que influenciam diretamente as propriedades do cimento, como a reatividade química e o tempo de pega, que são fundamentais na qualidade do cimento.

A Banda (459 cm^{-1}), encontrada no clínquer, foi Identificada no arroz carbonizado e no arroz triturado, essa banda sugere a presença de ligações C-Br, indicando possivelmente a presença de compostos orgânicos bromados, são compostos feitos a partir de carbono (C) e Bromo (Br) (Socrates, 2001).

Já a banda (519 cm^{-1}) Encontrada no clínquer e com bandas similares em outras amostras (540 cm^{-1}), no arroz triturado e (560 cm^{-1}) na cana-de-açúcar, essa banda sugere a presença de ligações C-X, onde X representa um halogênio. A presença de halogênios pode influenciar o tempo de pega e outras propriedades fundamentais do cimento (Socrates, 2001)

Segundo Socrates, 2001 a banda (876 cm^{-1}) encontrada no clínquer e em duas amostras, mandioca e bambu, está associada a vibrações de ligações C-O, indicando a presença de compostos orgânicos oxigenados, podendo ser utilizado na oxidação de compostos, essencial para a formação de óxidos, principais componentes do clínquer.

A banda em 1028 cm^{-1} , observada no arroz triturado e na mandioca, está associada às vibrações de ligações C-O. A presença de oxigênio nessas amostras confirma a existência de



compostos orgânicos oxigenados, os quais podem atuar como agentes oxidantes, desempenhando um papel importante nos processos químicos envolvidos na fabricação de cimento (Sócrates, 2001).

A banda em 1119 cm^{-1} , identificada exclusivamente no clínquer, indica a presença de sulfatos (SO_4^{2-}), um componente essencial para a composição do clínquer, com papel fundamental na regulação do tempo de pega e, conseqüentemente, na produção de cimento de qualidade (Sócrates, 2001).

Adicionalmente, as bandas em 1526 cm^{-1} (clínquer), 1577 cm^{-1} (cana-de-açúcar) e 1587 cm^{-1} (arroz carbonizado) podem ser atribuídas a vibrações de grupos N-H ou a vibrações em anéis aromáticos ($\text{C}=\text{C}$), sugerindo a presença de compostos orgânicos nitrogenados ou aromáticos. A presença de nitrogênio (N) nessas bandas é particularmente relevante, pois está relacionada a duas características essenciais em um clínquer de alta qualidade: sua composição e o tempo de pega, ambos fundamentais para as propriedades do cimento (Szafran et al., 1991). Nos dados abaixo, seguem as bandas encontradas nas amostras.

Figuras 22 - Atribuição das bandas encontradas nas amostras de biomassas e clínquer, com suas respectivas posições no espectro de infravermelho médio, conforme descrito na literatura.

Posição da Banda (cm^{-1})	Atribuição
448	Deformação do C-C-S ou Si-O-C
459	Vibração de estiramento C-Br ou C-Cl
519	Estiramento C-S ou vibração do anel de benzenos penta substituídos ou deformação N=N=N
540	Deformação angular de cadeia em $-(\text{CH}_2)_n-$ para $n > 3$ ou vibração esquelética C-C
794	Deformação angular de grupos etila ou estiramento C-Cl
1028	Estiramento assimétrico C-O-C
1038	Estiramento C-O
1079	Estiramento C-O
1089	Estiramento C-O
1119	Estiramento assimétrico S=O
1577	Deformação axial assimétrica em NO_2
2096	Estiramento $-\text{N}=\text{N}=\text{N}$
3062	Estiramento C-H
3296	Estiramento C-H
3327	Estiramento N-H

Fonte: Sócrates, 2001

Figuras 23 - Atribuição das bandas encontradas nas amostras de biomassas e clínquer, com suas respectivas posições no espectro de infravermelho médio, conforme descrito na literatura

Posição da Banda (cm ⁻¹)	Atribuição
468	Deformação C-C=O em plano
560	Estiramento C-Br
876	Deformação C-H fora do plano (CH ₂)
1404	Deformação angular de CH ₂
1415	Deformação angular de CH ₂
1526	Deformação angular assimétrica no plano de NH ₂
1587	Deformação axial assimétrica em NO ₂
1628	Estiramento C=C
2076	Estiramento C≡C

Fonte: Szafran et al., 1991

5.4 Formulações: Amostras das biomassas e clínquer

Com base nas análises realizadas por EDX e FT-IR, foram desenvolvidas formulações preliminares de clínquer combinado com diferentes biomassas. A análise EDX revelou a presença de elementos essenciais, como silício (Si), cálcio (Ca) e potássio (K), em teores elevados nas biomassas, destacando seu potencial para substituir parcialmente o clínquer tradicional na produção de cimento. Elementos como o silício, abundante no arroz carbonizado, e o cálcio, presente em grande quantidade no bambu e na cana-de-açúcar, são fundamentais para garantir a resistência e durabilidade do material cimentício.

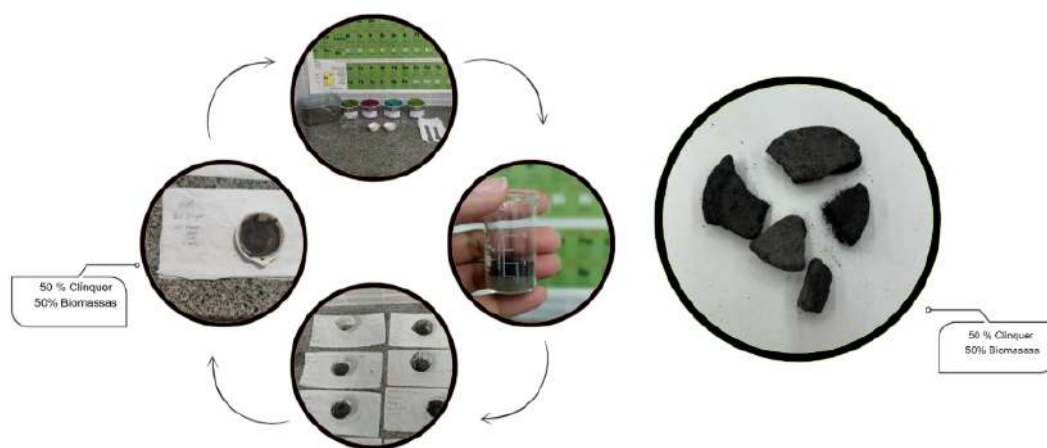
Complementando essa análise, os espectros FT-IR identificaram grupos funcionais importantes, como ligações C-O e sulfatos, que são críticos para a formação de compostos cimentícios. A presença de compostos orgânicos oxigenados e halogenados, revelada pelos espectros, sugere uma influência direta sobre propriedades essenciais do clínquer, como o tempo de pega e a resistência mecânica.

Embora ainda não tenhamos avançado para os testes físicos mais importantes previstos na metodologia, como os de consistência, essas formulações iniciais tiveram como objetivo entender o comportamento das biomassas em combinação com o clínquer. Essas

misturas preliminares permitiram avaliar a capacidade de solidificação e a velocidade de hidratação, fatores críticos para o desenvolvimento de um cimento eficiente.

O resultado mais promissor foi a combinação de 50% de clínquer e 50% de Climplant, com as proporções de bambu e arroz carbonizado sendo superiores às de cana-de-açúcar e cinzas de mandioca. Essa mistura proporcionou hidratação completa e uma consistência rígida, comparável à do concreto. Contudo, a mistura quebrou quando submetida à força mecânica.

Figura 24 a 28 - Processo de preparação e análise da combinação de 50% de clínquer e 50% de Climplant. À direita, o resultado da amostra após a aplicação de força mecânica, evidenciando sua ruptura



Fonte: Elaboradas pelos autores.

A tabela a seguir apresenta as formulações testadas.

Figuras 29 - Formulações com diferentes proporções de clínquer e biomassas, destacando a hidratação e a consistência após 24 horas

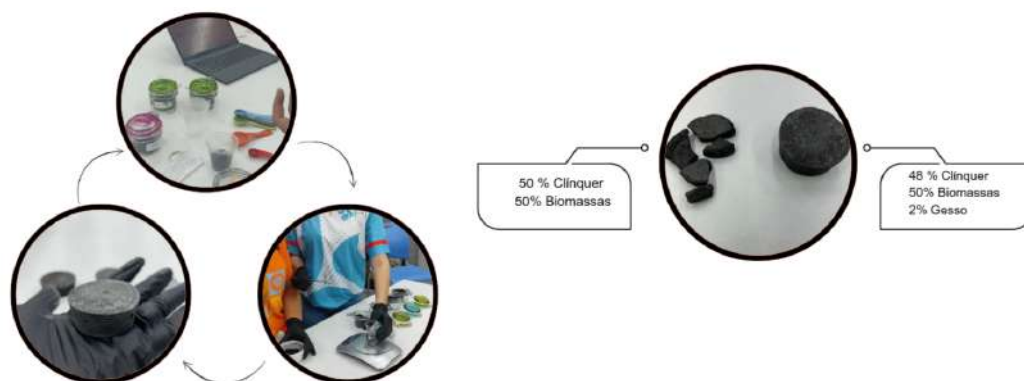


Composição	Proporção (%)	Hidratação	Observação após 24 horas
Clínquer puro + água destilada	100% Clínquer	Hidratação completa	Endurecimento total
Todas as Biomassas + Clínquer	70% Biomassas + 30% Clínquer	Boa adesão entre os compostos, não houve problemas de hidratação	Endurecimento parcial, não atingindo a rigidez do concreto
Arroz carbonizado + Bambu + Clínquer	1/3 de Arroz carbonizado; 1/3 de Bambu e 1/3 de Clínquer	Hidratação adequada	Endurecimento significativo com rigidez semelhante ao concreto
Mandioca + Clínquer	50% Mandioca + 50% clínquer	Hidratação adequada	Endurecimento fraco, sem consistência garantida
Todas as Biomassas + Clínquer	50% Biomassas + 50% Clínquer	Hidratação adequada	Consistência muito rígida, próxima ao do concreto
Bambu + Arroz carbonizado + Clínquer	25% Bambu; 25% Arroz carbonizado e 50% Clínquer	Hidratação adequada	Consistência com resultados positivos
Arroz carbonizado + Clínquer	50% Arroz carbonizado + 50% Clínquer	Hidratação adequada	Pouca rigidez
Bambu + Clínquer	50% Bambu + 50% Clínquer	Hidratação adequada	Consistência muito rígida, próxima ao do concreto

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com base nos resultados anteriores, avançamos no aprimoramento da formulação e alcançamos uma melhoria significativa na combinação de 50% de clínquer e 50% de Climplant. Reforçamos nossa análise, combinando as biomassas de acordo com os resultados químicos obtidos. Iniciamos com uma amostra de 25,26 g, composta por: Clínquer (48% - 12,13 g), Cinza de Bambu (20% - 5,05 g), Arroz Carbonizado (15% - 3,79 g), Cinza de Bagaço de Cana (10% - 2,53 g), Cinza de Mandioca (5% - 1,26 g) e Gesso (2% - 0,50 g), com cerca de 14 ml de água.

Figura 30 a 33 - Preparação da nova amostra de 25,26 g composta por Clínquer, Cinza de Bambu, Arroz Carbonizado, Cinza de Bagaço de Cana, Cinza de Mandioca e Gesso, com 14 ml de água



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Cada proporção foi cuidadosamente ajustada para equilibrar a contribuição de cada biomassa com as propriedades cimentícias desejadas, garantindo resistência, reatividade e durabilidade na formulação final. A amostra inicial foi composta por 25,26 g, distribuídas da seguinte forma:

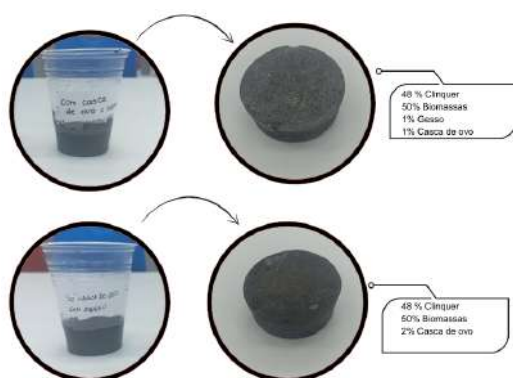
- **Clínquer (48% - 12,13 g):** Componente principal responsável por fornecer resistência mecânica e durabilidade ao composto, representando quase metade da formulação para garantir as propriedades cimentícias tradicionais.
- **Cinza de Bambu (20% - 5,05 g):** Escolhida pela sua elevada contribuição na formação de compostos cimentícios, especialmente em conjunto com a cinza de bagaço de cana, o que melhora a resistência da mistura.
- **Arroz Carbonizado (15% - 3,79 g):** Selecionado para aumentar a resistência e conferir maior estabilidade ao composto, devido à alta presença de sílica reativa.
- **Cinza de Bagaço de Cana (10% - 2,53 g):** Incluído para complementar a formação dos compostos cimentícios, promovendo maior aderência e coesão na mistura.
- **Cinza de Mandioca (5% - 1,26 g):** Utilizada em menor proporção, focando em sua capacidade de aumentar a reatividade e otimizar o tempo de pega do cimento.
- **Gesso (2% - 0,50 g):** Adicionado em pequena quantidade para regular o tempo de pega e melhorar a trabalhabilidade da mistura.

Embora o ajuste da nova formulação tenha apresentado resultados muito positivos, observamos que a aparência da amostra não ficou tão uniforme em comparação à amostra de cimento tradicional, também produzida com 25,26 g. Essa diferença está diretamente relacionada à granulometria, que ainda não atingiu o nível ideal.

Diante dos resultados obtidos com a adição de gesso, investigamos a viabilidade de sua substituição pela casca de ovo, considerando sua elevada concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3), um precursor fundamental do óxido de cálcio (CaO) (Freire et al., 2008). Essa composição química confere à casca de ovo um potencial significativo como insumo alternativo na formulação do Climplent, promovendo a sustentabilidade do material e reduzindo a dependência de recursos tradicionais da indústria cimenteira.

Com base nos resultados promissores da última formulação, realizamos novos testes mantendo as proporções de clínquer e biomassas, porém variando a quantidade de gesso. Foram preparadas duas amostras: a primeira contendo 1% de gesso e 1% de casca de ovo, e a segunda sem adição de gesso, substituído integralmente por 2% de casca de ovo. Os ensaios demonstraram que ambas as amostras permaneceram rígidas; contudo, a formulação sem gesso apresentou uma maior dispersão das partículas, indicando menor coesão e ausência de selamento completo da matriz cimentícia.

Figura 34 a 37 - Amostras com diferentes proporções de gesso e casca de ovo



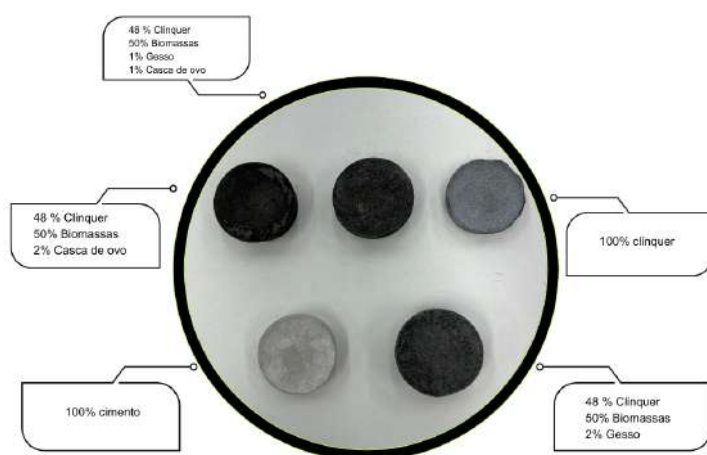
Fonte: Elaboradas pelos autores.

Vale ressaltar que essas formulações preliminares não substituem os ensaios físicos detalhados que ainda serão conduzidos, mas fornecem uma base fundamental para garantir uma adequada solidificação e uma hidratação eficiente, assegurando a qualidade do material cimentício.

A realização dessas experimentações é essencial para validar a viabilidade das biomassas como alternativas sustentáveis na produção de cimento, antes da implementação de avaliações mais rigorosas. Como mencionado acima, foram testadas diferentes formulações que permitiram analisar o impacto da substituição parcial do clínquer em comparação com composições tradicionais.

Ao final, além dos testes com as biomassas, as formulações analisadas incluem uma amostra de referência composta por cimento convencional (100% cimento) e outra contendo exclusivamente clínquer (100% clínquer). As demais composições investigam a substituição de 50% do clínquer por biomassas, com variações na proporção de gesso e casca de ovo. Os resultados preliminares apontam diferenças na integridade estrutural das amostras, fornecendo dados relevantes para a otimização da formulação do Climplent e sua aplicação na indústria cimenteira.

Figura 38 - Amostras de compostos cimentícios com diferentes proporções de cimento, clínquer, biomassas, gesso e casca de ovo



Fonte: Elaboradas pelos autores.

5.5 Análise física do climplent incorporada ao clínquer: avaliação da granulometria e consistência normal

Para iniciar a análise física, incluindo os testes de consistência e granulometria do composto de biomassas incorporado ao clínquer, foi necessário seguir os critérios estabelecidos pela norma NBR NM 43, que exige 500 g de material para a análise inicial.

Para garantir a padronização em relação aos testes anteriores, nos quais as amostras utilizadas eram de 25,26 g, ajustamos a proporção das biomassas para um total de 500 g, mantendo a mesma relação entre os componentes. A formulação final ficou composta por 48% de clínquer (240 g), 20% de cinza de bambu (100 g), 15% de arroz carbonizado (75 g), 10% de cinza de bagaço de cana (50 g), 5% de cinza de mandioca (25 g) e 2% de gesso (10 g).

Após a preparação, o material foi transportado para o Laboratório de Estruturas de Materiais da Universidade Federal de Alagoas (LEMA/UFAL), onde realizamos o teste de granulometria. Durante a análise, verificamos que a amostra não apresentava a granulometria adequada. Por isso, submetemos o material a um novo processo de trituração e maceração. Para garantir a granulometria correta, utilizamos a peneira ABNT com abertura de malha de 0,075 mm.

Figura 39 a 42 - Processo de peneiração na peneira ABNT malha 0,075 mm



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Figura 43 - A esquerda da imagem, observa-se a amostra sem a granulometria adequada; à direita, a amostra após a passagem pela peneira ABNT de 0,075 mm



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Os resultados indicam que o método inicial de maceração das biomassas pode não ter sido a abordagem mais eficiente para alcançar a granulometria desejada. Durante a análise, verificou-se que a textura e a distribuição das partículas ainda apresentavam inconsistências, o que sugere a necessidade de aprimoramento do processo. Diante disso, uma alternativa mais eficaz seria a utilização de técnicas avançadas, como a moagem de alta energia, de acordo com (Torres, 2010) essa técnica se trata de uma síntese mecano-química em que as misturas de pós de diferentes metais ou ligas são moídas conjuntamente para obtenção de uma liga homogênea, através da transferência de massa. Que permite uma maior homogeneização das partículas, otimizando a maceração e aumentando a eficiência do processamento das biomassas.

Posteriormente, iniciamos o teste para determinar a consistência normal da pasta. O objetivo deste ensaio é definir a quantidade de água necessária para obter uma consistência normal na pasta. Inicialmente, zeramos o aparelho e aplicamos um desmoldante para facilitar a retirada da pasta ao final do ensaio.

Em seguida, misturamos 500 g da biomassa com 400 ml de água utilizando uma batedeira específica para cimentos. Após essa mistura, deixamo-la descansando no tronco cônico por 45 segundos antes de liberarmos lentamente a sonda até atingir uma placa plana, onde obtivemos um resultado entre 6 ± 1 mm, valor considerado adequado conforme as normas vigentes.

Figura 44 a 51 - Processo de preparação para o teste de consistência, abrangendo a pesagem do material, a mistura com água, a calibração da sonda Tetmajer, a obtenção dos resultados e a observação da amostra após a solidificação



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Ao término do procedimento, verificou-se que foi utilizado um volume de 400 mL de água, em substituição aos 150 mL previstos no protocolo experimental. Esse acréscimo hídrico pode comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, resultando em menor resistência e maior porosidade da matriz cimentícia.

Diante disso, uma alternativa viável é considerar o uso de aditivos, como a sílica ativa. Segundo Carmo (2008), esse material possui propriedades que reduzem a quantidade de água necessária na produção do concreto. Além disso, a sílica ativa contribui para a diminuição da permeabilidade do concreto, protegendo seu interior e aumentando sua vida útil e durabilidade.

A realização desses testes mostrou-se essencial para ajustar as propriedades físicas das cinzas às características esperadas em materiais convencionais, como os cimentos Portland tradicionais, garantindo consistência e granulometria compatíveis com o cimento comum. Isso proporciona adequada capacidade de solidificação e velocidade de hidratação.

5.6 Climplent como alternativa ao clínquer: classificação com base na análise EDX e comparação com cimentos convencionais

Esta seção apresenta a análise da amostra híbrida composta por clínquer e Climplent, proposta como uma alternativa mais sustentável ao cimento Portland tradicional. A caracterização da amostra foi realizada por meio da técnica de espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDX), com o objetivo de identificar os elementos químicos presentes e compará-los aos constituintes típicos de cimentos convencionais. Embora os resultados obtidos ainda sejam preliminares, eles permitem levantar hipóteses sobre o potencial do Climplent como aditivo cimentício e indicam direções promissoras para sua validação técnica e ambiental.

A composição química identificada por meio da análise EDX evidencia a compatibilidade da amostra com Climplent com os requisitos estabelecidos para cimentos pozolânicos, especialmente os da classe CP IV, conforme a ABNT NBR 5736:1991. A elevada concentração de silício (20,31%) indica a presença significativa de sílica reativa, elemento essencial para a formação de compostos pozolânicos que conferem maior durabilidade e resistência ao cimento ao longo do tempo (Ahmed et al., 2019). Esse comportamento é típico de materiais cimentícios suplementares utilizados em cimentos CP IV.

Segundo Lea, (2003) O teor elevado de cálcio (57,71%) sugere a manutenção das propriedades mecânicas essenciais dos cimentos Portland, por meio da formação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), responsáveis pela resistência e endurecimento da matriz. Em relação aos teores de ferro (6,52%) e potássio (9,62%) demonstram a contribuição das cinzas vegetais presentes no Climplent, promovendo a formação de compostos como o C_4AF e influenciando diretamente características como a trabalhabilidade, o tempo de pega e a hidratação do cimento (Mehta; Monteiro, 2013).

Adicionalmente, a presença de enxofre, associada à adição de gesso durante o processo de moagem, está em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 16697:2018, assegurando o controle adequado do tempo de pega por meio da regulação da hidratação do aluminato tricálcico (C_3A). A combinação desses elementos reafirma o potencial técnico da

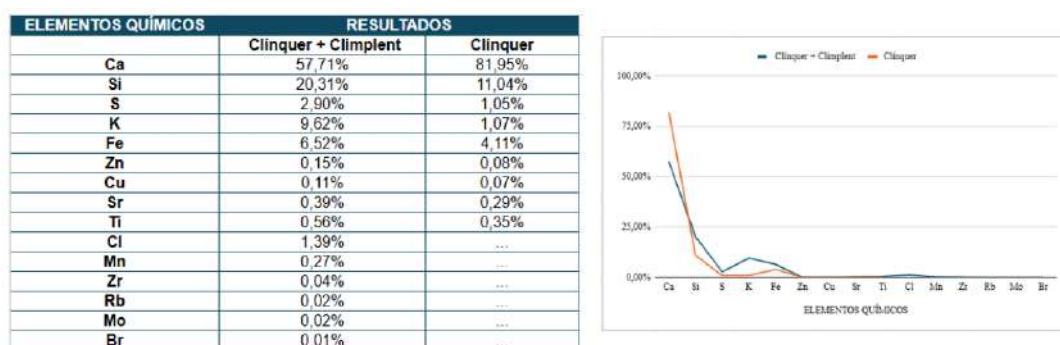
formulação híbrida, alinhando-se às exigências normativas e ambientais para cimentos com menor impacto ambiental.

Cabe destacar que a composição química do Climplent, aliada à redução do teor de clínquer para aproximadamente 48%, não apenas viabiliza sua classificação como cimento CP IV, como também o posiciona como uma solução alinhada aos princípios da economia circular e da sustentabilidade.

Estudos prévios demonstram que biomassas como casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, casca de mandioca e bambu apresentam elevado potencial pozolânico (Lowe, 2012; Silva et al., 2005; Albuquerque et al., 2018; Qudos et al., 2024), contribuindo para a formação de compostos secundários com desempenho técnico satisfatório e redução das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento tradicional (Mehta; Monteiro, 2014).

Nas imagens abaixo apresentam os resultados da composição química obtida por espectroscopia de dispersão de energia (EDX) para duas amostras: clínquer puro e a formulação composta por clínquer e Climplent.

Figura 52 e 53 - Resultados da Análise do EDX-720 para a formulação: Clínquer e Climplent



Fonte: Elaboradas pelos autores.

Para um entendimento mais abrangente da composição dos cimentos Portland disponíveis no mercado nacional, apresenta-se, a seguir, uma tabela com a composição química típica de diferentes tipos de cimento comercializados no Brasil, conforme dados obtidos na literatura técnica. Tal apresentação permite uma análise comparativa entre os teores médios dos principais óxidos presentes nas formulações, contribuindo para contextualizar a proposta do Climplent frente às composições convencionais.

Figura 54 - Fluorescência de raios X de diferentes tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

Cimentos	Determinações							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Outros
CPV - ARI	64,6	17	6,9	3,4	2,7	0,9	1,3	0,4
CP IV - 32 RS	45,7	29,1	9,8	3	1,9	4,3	1,8	0,7
CP III - 40 RS	59,1	21,2	6,6	3,2	3,2	2,3	0,6	0,7
CP II - E - 32	62,3	12,9	4,2	3,4	2,8	2,2	1	0,5

Fonte: Elaboradas pelos autores.

Com base na composição química observada, o Climplent pode ser classificado como um material com elevado potencial pozolânico, devido à presença abundante de sílica reativa e óxidos metálicos. Essa característica o aproxima dos cimentos pozolânicos, como o tipo CP IV, conforme os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 5736:1991.

A possível classificação do Climplent como CP IV, mediante a comprovação da reatividade das cinzas, reforça seu potencial de inserção no mercado como uma alternativa compatível com as normas brasileiras — como a ABNT NBR 5736:1991, ABNT NBR 16697:2018 e ABNT NBR 16699:2018 —, atendendo aos critérios de desempenho técnico e ambiental esperados para os cimentos modernos.

Portanto, os resultados da análise apontam para a viabilidade do Climplent como material substitutivo parcial ao clínquer em cimentos do tipo CP IV. Contudo, reforça-se a necessidade de estudos complementares — físicos, mecânicos e de durabilidade — para validar, em conformidade com as normas técnicas vigentes, sua aplicação em escala industrial.

5.7 Economia circular e sustentabilidade na indústria cimenteira: análise da viabilidade econômica do Climplent como alternativa ao clínquer

O Climplent surge como um produto inovador na indústria cimenteira ao adotar os princípios da economia circular, definida como uma abordagem regenerativa que mantém os materiais em ciclos contínuos de uso, eliminando o conceito de resíduo (Geissdoerfer et al., 2017). Essa abordagem é especialmente relevante diante dos impactos ambientais associados à produção convencional de cimento.

Diante desse cenário crítico, o Climplent contribui diretamente para a redução das emissões de carbono associadas ao clínquer tradicional, alinhando-se às diretrizes internacionais para a descarbonização setorial discutidas no Fórum Econômico Mundial (2023).

Essa inovação tecnológica é particularmente significativa frente aos desafios ambientais enfrentados pela indústria cimenteira em escala global. Segundo Martirena e Scrivener (2015), o cimento Portland é amplamente utilizado devido às suas propriedades aglomerantes excepcionais; no entanto, sua produção gera, em média, 900 kg de CO₂ por tonelada fabricada, sendo uma das principais fontes industriais de gases de efeito estufa.

A introdução do Climplent atua diretamente nessa problemática ao reduzir significativamente a dependência do clínquer e promover o reaproveitamento sustentável de resíduos agrícolas brasileiros. Ademais, práticas circulares como as adotadas pelo Climplent são fundamentais para otimizar recursos naturais e reduzir desperdícios industriais (Corvellec et al., 2022; Romero et al., 2021).

Além dos benefícios ambientais diretos, o Climplent também gera impactos econômicos e sociais positivos ao fomentar novas cadeias produtivas regionais baseadas na valorização dos resíduos agrícolas. A Fundação Ellen MacArthur (2023) destaca que a implementação da economia circular pode gerar ganhos econômicos significativos e criar oportunidades de negócios sustentáveis.

Em larga escala, estima-se que, para cada tonelada de Climplent produzida, cerca de 500 kg de resíduos agrícolas sejam desviados de aterros sanitários ou descartes inadequados. Ou seja, metade da composição do Climplent é formada por resíduos que seriam descartados, mas passam a ser reaproveitados no produto, contribuindo para novas fontes de renda aos agricultores locais e fortalecendo as relações comerciais entre produtores rurais e a indústria cimenteira (Ghisleni; Rocha, 2020).

Do ponto de vista estratégico, o modelo de negócios do Climplent está centrado na venda direta B2B para construtoras e indústrias da construção civil, com foco na redução da pegada de carbono. O produto é acessível, replicável e promove cadeias produtivas locais. A

comercialização será realizada também por meio de parcerias com distribuidores e representantes do setor, além de participação em feiras, eventos e marketing digital especializado.

A proposta de valor do Climplent inclui não apenas a substituição parcial do clínquer por biomassas, mas também a conformidade com padrões técnicos e ambientais rigorosos, o que garante segurança e certificação para o setor da construção. O produto se posiciona como alternativa viável tanto técnica quanto economicamente, promovendo soluções ecológicas para obras sustentáveis.

O relacionamento com os clientes será mantido por meio de suporte técnico, acompanhamento pós-venda, programas de sustentabilidade e workshops. Além da venda de cimento, o modelo de negócio contempla serviços como consultorias, treinamentos e o licenciamento da tecnologia, permitindo a replicação regional do modelo por produtores locais.

A viabilidade econômica do Climplent como alternativa ao clínquer tradicional pode ser observada a partir de uma análise comparativa dos custos de produção. Enquanto o cimento convencional apresenta custos entre 46 e 58 euros por tonelada, o Climplent pode reduzir esse valor em até 30%, representando uma economia considerável no processo de fabricação. Essa redução se torna ainda mais relevante frente aos crescentes valores da taxa sobre emissões de carbono, que em alguns mercados, como o europeu, podem alcançar até 100 euros por tonelada de CO₂ (McKinsey & Company, 2022).

Além da redução de custos operacionais, o modelo de negócio circular proposto pelo Climplent possibilita a geração de novos fluxos de valor, ao transformar passivos ambientais em ativos econômicos. Segundo a McKinsey & Company, em parceria com o Fórum Econômico Mundial, modelos circulares na indústria cimenteira podem gerar aproximadamente €110 bilhões em valor líquido até 2050, mediante a criação de ciclos fechados de minerais, materiais e energia.

A análise dos custos mostra que a incorporação das biomassas calcinadas permite uma redução significativa no valor final do produto em relação ao cimento convencional. Essa

estratégia reforça a competitividade econômica do Climplent, ao mesmo tempo em que valoriza os resíduos agrícolas e consolida sua contribuição para um modelo produtivo mais sustentável e alinhado à economia circular.

Para a análise dos custos de produção do saco de cimento com a adição do Climplent, foram projetados dados com base no valor por tonelada de cada biomassa utilizada. Apresentaram-se duas formulações distintas do composto, considerando-se os respectivos custos de produção tanto com base no valor bruto das matérias-primas quanto após o processo de calcinação. Além disso, incluiu-se o custo por tonelada de clínquer, com o objetivo de permitir uma comparação precisa entre os diferentes componentes empregados na composição cimentícia.

Ressalta-se que, neste estágio inicial, os valores apresentados correspondem a estimativas projetadas, uma vez que determinadas variáveis operacionais, logísticas e regionais ainda não foram incorporadas à análise. Assim, os dados apresentados visam oferecer um panorama preliminar da viabilidade econômica do Climplent, servindo como base para estudos posteriores mais aprofundados e com maior precisão técnica.

Observa-se que o custo total por saco da formulação padrão do Climplent — denominada Mistura 1, composta por 48% de clínquer, 50% de biomassas e 2% de gesso — é de R\$ 58,45. Esse valor se mostra competitivo em comparação aos custos médios do cimento Portland, especialmente quando se consideram os crescentes encargos relativos à taxa de carbono e os impactos ambientais associados à produção do clínquer.

É importante destacar que esse valor foi calculado com base na formulação e na proporção específica de cada biomassa no composto, garantindo um equilíbrio entre desempenho técnico, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, conforme apresentado na seção 4.4.

Os custos dessas biomassas, após o processo de calcinação, variam significativamente — de R\$ 3.348,21 por tonelada (cinza de bambu) a R\$ 9.736,83 por tonelada (cinza de mandioca). Ainda assim, o custo por saco dessas biomassas varia entre R\$ 12,17 e R\$ 16,74,



demonstrando a viabilidade de sua aplicação na indústria cimenteira, considerando os benefícios técnicos, ambientais e sociais associados.

Em contrapartida, a Mistura 2, composta por 68% de clínquer, 30% de biomassas e 2% de gesso, apresenta custo de R\$ 21,14. Mesmo com um percentual reduzido de substituição, o custo total por saco da Mistura 2 é significativamente inferior tanto à Mistura 1 quanto ao cimento tradicional.

Figura 55 - Análise comparativa dos custos de produção do saco de cimento com o Climplent com base na composição de biomassas

Material	Preço Bruto (R\$/ton)	Preço após a calcinação (R\$/ton)	Custo por saco 50KG (R\$)	Mistura 1 (R\$) 48% Clínquer, 50% Climplent e 2% Gesso	Mistura 2 (R\$) 68% Clínquer, 30% Climplent e 2% Gesso
Clínquer	257	N / D	3,08	3,08	4,37
Gesso	500	N / D	0,25	0,25	0,25
Cinza de Bambu	150	3.348,21	16,74	16,74	5,02
Arroz Carbonizado	2.375,20	3.541,50	13,29	13,29	3,98
Cinza de Bagaço de Cana	128,67	5.167,47	12,92	12,92	3,87
Cinza de Mandioca	613,42	9736,83	12,17	12,17	3,65
Custo Total (R\$/Saco)			58,45	58,45	21,14

Fonte: Elaborada pelos autores.

A redução dos custos observada evidencia o potencial do Climplent para atender simultaneamente às exigências ambientais e econômicas da indústria cimenteira. Tal desempenho torna-se ainda mais expressivo quando são aplicadas estratégias de formulação baseadas em proporções otimizadas das biomassas disponíveis, o que permite maximizar o aproveitamento dos resíduos agrícolas e minimizar a dependência de matérias-primas convencionais.

As análises preliminares reforçam a eficácia do modelo de economia circular adotado, centrado na valorização de subprodutos agroindustriais e na substituição estratégica do clínquer. Além de promover impactos ambientais positivos, essa abordagem demonstra viabilidade econômica concreta ao transformar materiais de baixo valor comercial em insumos com aplicação direta na construção civil, evidenciando seu potencial competitivo e seu alinhamento com práticas sustentáveis de produção.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição parcial do clínquer por biomassas na formulação de um material cimentício alternativo, denominado Climplent. A partir desse propósito, os resultados obtidos indicam que a pesquisa alcançou plenamente seus objetivos, demonstrando o potencial das biomassas selecionadas como insumos eficientes na produção de cimento mais sustentável.

Entre os principais achados, destacam-se os resultados da análise EDX, que confirmaram a presença expressiva de óxidos metálicos e sílica nas biomassas, elementos essenciais à atividade pozolânica e à formação de compostos cimentícios de qualidade. A análise FT-IR corroborou esses resultados, evidenciando bandas de absorção típicas de grupos funcionais relevantes, como silanol (Si-OH), carbonatos e aluminatos, que indicam a capacidade do Climplent de participar das reações químicas características do cimento Portland.

Adicionalmente, o estudo apresentou formulações economicamente viáveis, com destaque para a composição padrão (48% clínquer, 50% biomassas e 2% gesso), que resultou em um custo estimado de R\$58,45 por saco. Outra formulação, com maior teor de clínquer, apresentou custo ainda mais reduzido, de R\$21,14 por saco, demonstrando a competitividade do Climplent frente aos materiais convencionais.

No entanto, é importante reconhecer as limitações desta pesquisa, sobretudo a ausência de ensaios físico-mecânicos, como resistência à compressão, durabilidade e tempo de pega. Tais análises são imprescindíveis para validar a aplicação prática do Climplent em larga escala, de modo que, embora as caracterizações químicas e espectroscópicas indiquem um desempenho promissor, a total confiabilidade do material ainda depende de investigações complementares.

Este trabalho representa uma contribuição significativa para o campo dos materiais de construção sustentáveis, ao propor uma alternativa que alia a valorização de resíduos agrícolas ao enfrentamento dos impactos ambientais provocados pela indústria cimenteira, uma das maiores emissoras de CO₂ globalmente. A proposta do Climplent se alinha, portanto, às estratégias contemporâneas de economia circular e redução da pegada de carbono,

promovendo também benefícios socioeconômicos através da geração de novas cadeias produtivas locais.

Para pesquisas futuras, será realizada a condução de ensaios físico-mecânicos, com foco na determinação da resistência à compressão do cimento Portland, além da inclusão de testes com adição de sílica ativa, visando avaliar a possibilidade de redução no teor de água nas formulações desenvolvidas. Também se propõe a ampliação do escopo da pesquisa para investigar outras biomassas regionais que possam ser incorporadas ao Climplant. Além disso, a realização de estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) e de testes em ambientes reais de construção é fundamental para consolidar o material como uma alternativa segura, eficiente e ambientalmente responsável ao clínquer tradicional, contribuindo para a inovação e a sustentabilidade na indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

AHMED, T. et al. **Influence of rice husk ash on the properties of self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 297-308, 2019.

ALBUQUERQUE, G. A. R. et al. **Pozzolanic activity of cassava residue ash: Chemical, physical and microstructural characterization.** *Journal of Building Engineering*, v. 19, p. 553-561, 2018.

BENHELAL, E.; ZAIDI, S.; SHAMSUDDIN, E.; RASHID, M. A novel approach for the production of sustainable cement: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142-156, 2013.

BORGES, P. H. R. et al. **Influence of mineral additions on the durability of Portland cement composites.** *Materials and Structures*, v. 54, n. 2, p. 1-15, 2021.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Ensaio com cimento.** Natal: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2013.

CARDOSO, Thiago Costa. **Propriedades físico-químicas, hidratação e reologia de cimentos ternários com reduzido teor de clínquer a partir de argila não calcinada e filer calcário.** 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

CARMO, JBM do; PORTELLA, KF. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto.** *Cerâmica*, São Paulo, v. 54, n. 330, pág. 309-318, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/GXJkkmZfvGB3K9VCvm9mdNd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 mar. 2025.

CASTRO, Vinicius Gomes de. Cimento portland. *In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o futuro.* Mossoró: Edufersa, 2021. p. 13-21.

CENTURINE, Sérgio Luiz. **A mineralização do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos.** 1999. 156 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

COLNAGO, L. A.; ALMEIDA, F. C. L.; VALENTE, A. P. Espectrometria de massa e RMN multidimensional e multinuclear: revolução no estudo de macromoléculas biológicas. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 16, p. 9-14, 2002.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

CORVELLEC, Hervé; STOWELL, Alison; JOHANSSON, Nils; STOWELL, Alison F. Critiquing circular economy's desirability for sustainable consumption and production. *Journal of Industrial Ecology*, v. 26, n. 2, p. 421-435, 2022

CRUZ, Tami Aline da; SANTOS, Fernando dos. **Uso do cimento de aluminato de cálcio como ligante para emulsões cerâmicas.** 2014. Disponível em: https://www.sbpnet.org.br/livro/67ra/resumos/resumos/3724_12915bece4832c362b64ee07374a70306.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.* Cowes: Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2023.

FREIRE et al. Avaliação da casca de ovo como fonte alternativa de carbonato de cálcio na produção de materiais cimentícios sustentáveis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.5, p.543-548, 2008.

GATES, Bill. **Como evitar um desastre climático.** São Paulo: Companhia das Letras, 2021.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy M. P.; HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHISLENI, Geisiele; ROCHA, Janaíde Cavalcante. Avaliação experimental de subprodutos como precursores no desenvolvimento de sistemas álcali ativados. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). *Concrete Future Roadmap for Net Zero Concrete*. Londres: GCCA Publications, 2023.

GROTTO, Helena Z. W. Fisiologia e metabolismo do ferro. **Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia**, Campinas, v. 32, p. 8-17, 2010.

GUIMARÃES, Cleidson Carneiro. **Cinza da casca de mandioca em substituição parcial ao cimento portland na produção das argamassas**. Feira de Santana: Universidade Federal do Recôncavo Baiano, 2017.

HEWLETT, P. C. (Ed.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2004.

KARSTENSEN K.H., Formation and release of POPs in the cement industry: a review of technologies and practices for emission reduction. *Chemosphere*, v.65(6), p.1001-1012.,2006.

LEA, F. M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd ed. Edward Arnold, 2003.

LOWE, R. K. **Pozzolanic activity of various biomass ashes in Portland cement blends**. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 10, p. 1190-1197, 2012.

MALUF, Luiz F.; AGUIAR, Fernando F. *O processo de Moagem de Minérios*. SciELO, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/YZjpt37Mk59nqmmzcrG7ccP/?lang=pt#:~:text=O%20processo%20de%20Moagem%20de,atrav%C3%A9s%20da%20transfer%C3%A2ncia%20de%20massa>. Acesso em: 12 mar. 2025.

MARTIRENA-HERNÁNDEZ J.F.; SCRIVENER K.L.. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v78,p3-18.,2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4th ed. McGraw-Hill Education, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Sustainability of concrete**. *Nature Materials*, v. 13, n. 11, p. 1043-1049, 2014.

MENDONÇA, Marcelly de Figueiredo. **Substituição parcial do cimento portland por cinzas de bambu (*Bambusa vulgaris*)**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

PEREIRA, Alex Gomes; VIEIRA, Cristiano da Silva; OLIVEIRA, Marcelo Batista de; PAIVA, Júnior Cleber Alves; SILVA, Rafael Luis da; TRINDADE, Avenilson Gomes da; LACERDA, Benício de Moraes. Uma revisão sobre a utilização de cinza de casca de arroz na construção civil. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 3, 2021.

PEREIRA, Thereza Mylene de Moura. **Caracterização térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual de hormônios bioidênticos estriol e estradiol**. 2013. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PRADO, Júlia Espíndula Araújo; FUJIWARA, Flora Lyn; CONTRERAS, Francisco; SILVA, Victor. Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 53, p. 154-166, seq. tem., 2022.

QUDOOS, A. et al. **Utilization of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material in concrete: A review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 439, p. 140702, 2024.

QUEIROZ, Sonia. C. N; COLLINS, Carol H; JARDIM, Isabel C.S. F. Métodos de extração e/ou concentração de compostos encontrados em fluidos biológicos para posterior determinação cromatográfica. **Rev. Química Nova**, Campinas, v.24, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/GqB7NmLvrNqNYwVdXqj7hjg/>. Acesso em: 27Jun.2024.

RODRIGUES, A. da C.; FURTADO, A. C. S.; MAGALHAES, M. M.; SOUZA, F. I. B. de. Análise química por espectroscopia de raio-x por dispersão energia (EDS): adaptação aplicada à raízes de dendezeiro (*Eleais guineensis* JACQ.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, nº 21. Belém, setembro, 2017.

ROMERO, D. et al. Towards circular economy in manufacturing systems. *Procedia CIRP*, v96, p1-6, 2021.

SILVA, G. et al. **Evaluation of bamboo ash as a supplementary cementitious material**. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 11, p. 2188-2192, 2005.

SOCRATES, George. **Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

SOUZA, Bruno Bolsanelo de; BORGES, Sergio Pinto de Moura Souza. **Influência dos cloretos de sódio e de potássio nas propriedades plásticas e no comportamento mecânico**

de pastas para cimentação de poços de petróleo. 2011. 138 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SZAFRANS, Z.; Pike, R.M.; Singh, M.M. *Microscale Inorganic Chemistry*, John Wiley & Sons Inc., London, chap. 6, p. 114-125, 1991.

TECNOSIL. Principais vantagens de usar sílica ativa. *Tecnosil*, Itupeva, 10 jul. 2019. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/principais-vantagens-de-utilizar-silica-ativa/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

THAIN, Simon. **Espectroscopia IR e Espectroscopia FTIR: Como funciona um espectrômetro FTIR e análise FTIR.** 2022. Disponível em: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/ir-spectroscopy-and-ftir-spectroscopy-how-an-ftir-spectrometer-works-and-ftir-analysis-363938#D2>. Acesso em: 30 fev. 2024.

VALENTIM, Larissa. **Cinza do bagaço de cana-de-açúcar contribui para durabilidade do concreto.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2020. Disponível em: https://www.ufpe.br/agencia/pesquisas-bkp/-/asset_publisher/rIL2cIuRIxA4/content/cinza-do-bagaco-de-cana-de-acucar-contribui-para-durabilidade-do-concreto/40623. Acesso em: 29 fev. 2024.

VASCONCELOS, Marcela Correia de Araújo. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos.** 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.