



UNIDADE INTEGRADA Sesi/SENAI CARLOS GUIDO FERRARIO LOBO

CLIMPLENT: COMPOSTO DE BIOMASSAS PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO

MACEIÓ-AL

2024



Maria Clara Lira de Melo
Matheus Pereira de Lima
Millena Teles Pita Vanderlei Melo

Orientadora: Francisca Nogueira Martins
Coorientador: Erivaldo Davi dos Santos Júnior

CLIMPLENT: COMPOSTO DE BIOMASSAS PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO

Relatório apresentado à 7ª FEMIC - Feira Mineira de Iniciação Científica.

Orientação da Profª. Francisca Nogueira Martins e coorientação do Profº. Erivaldo Davi dos Santos Júnior.

MACEIÓ-AL

2024



RESUMO

A indústria cimenteira, crucial para o desenvolvimento global, tem gerado grandes impactos ambientais, como altas emissões de CO₂ e uso excessivo de recursos naturais. A crescente demanda pela descarbonização tem incentivado a busca por alternativas mais sustentáveis para mitigar esses efeitos. Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo desenvolver um composto a partir de biomassas para a produção de cimento, visando promover a sustentabilidade na indústria cimenteira e obter ganhos econômicos por meio de uma produção consciente e de baixo impacto ambiental. Pesquisas preliminares indicam que materiais como bagaço de cana-de-açúcar, fibras de bambu, casca de mandioca e fibras de arroz apresentam composição química semelhante ao clínquer, principal componente do cimento convencional. Para caracterizar detalhadamente o composto, serão realizadas análises como EDX, FT-IR, TG e Espectrometria de Massa, que fornecerão informações sobre a composição química, estrutura e propriedades das amostras, permitindo uma avaliação abrangente da visão do composto. Além disso, serão realizadas análises físicas para garantir que a consistência e a granulometria do material sejam compatíveis com o cimento tradicional. Os resultados preliminares são promissores: as amostras processadas por incineração, trituração ou moagem apresentaram pH neutro e características químicas semelhantes. A análise da EDX revelou altos teores de silício no arroz carbonizado (76,8%), cálcio no bambu (48,5%) e potássio na mandioca (46,7%). A análise FT-IR apoiou a presença de grupos funcionais semelhantes, apontando o potencial das biomassas como alternativas sustentáveis. A combinação mais promissória consiste em 50% de clínquer e 50% de Climplent, com maior proporção de bambu e arroz carbonizado. As etapas seguintes focarão no aprimoramento dos resultados e na fabricação de blocos de concreto, ampliando o processo de descarbonização na indústria cimenteira.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Biomassas, Descarbonização



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 JUSTIFICATIVA	6
3 OBJETIVO GERAL	9
4 METODOLOGIA	10
5 RESULTADOS OBTIDOS	13
6 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
REFERÊNCIAS	23



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 CO_2 (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 (SiO_2), os principais componentes do cimento, têm a responsabilidade de resistência do material e, quando hidratados, formam cristais amplamente resistentes. Já o aluminato de cálcio (AlO_2) 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 CO_2 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.

Por isso, 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.

Para isso, a seleção de matérias-primas que garantam a essencialidade na composição é uma etapa crucial no processo de produção, uma vez que, além de garantir a qualidade e a adequação dos materiais utilizados em diferentes regiões, tornando uma solução mais acessível e adaptável às características locais de disponibilidade de recursos, é imprescindível não desencadear mais 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,

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

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%; 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 climplet, 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 climplet 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

- 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;
- 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).

3.1 Preparação da matéria-prima

Após a aquisição da matéria-prima dos fornecedores, avançaremos para a fase de limpeza e secagem, conforme é necessário para o avanço da testagem. A casca de mandioca será exposta ao sol para secar e, em seguida, incinerada entre 150°C e 350°C . Posteriormente, o bagaço da cana e o bambu serão incinerados separadamente, a 600°C , para produzir suas cinzas. Após a queima de todos os materiais, procederemos à trituração e à moagem da casca de arroz até obter um fino pó através da peneiração (CORDEIRO, 2009).

As amostras obtidas por calcinação, trituração e moagem serão cuidadosamente armazenadas, com identificação precisa, vedação hermética, e acondicionadas em um dessecador para preservação ideal.

3.2 Análise química

Após a preparação das amostras derivadas de fontes orgânicas, avançaremos para a realização dos testes químicos. As amostras dos quatro componentes de biomassa serão preparadas separadamente, junto com uma amostra do clínquer obtido junto à 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), FT-IR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier), TG (Termogravimetria) e a Espectrometria de Massa.

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 (Thain, 2022).

A Termogravimetria fornece informações sobre as transformações físicas e químicas que ocorrem na amostra em função da temperatura, como umidade, desidratação e oxidação (Pereira, 2013).

De acordo com Colnago *et al.* (2002), os espectrômetros de massas são compostos, principalmente, por uma interface conectada ao sistema de introdução de amostra, uma fonte de ionização, um acelerador de íons, um analisador de massas e um detector, todos funcionando em um ambiente de alto vácuo. Esses espectrômetros são frequentemente empregados em associação com outras técnicas analíticas, tais como cromatografia gasosa (GC), cromatografia líquida (LC) e espectrometria de plasma induzido (ICP), expandindo, dessa forma, as capacidades de análise disponíveis.

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

3.3 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).

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



5. RESULTADOS OBTIDOS

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, quando o material estava em nossa posse, 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.

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: Elaboradas pelo autor

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: Elaboradas pelo autor

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 assemelha às do clínquer.

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.

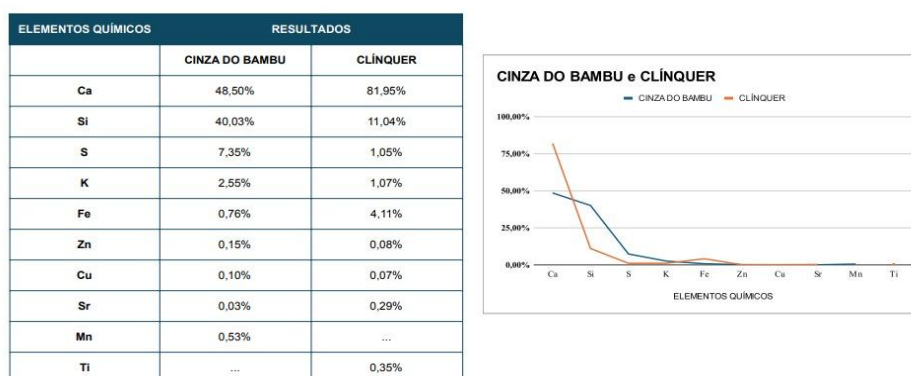


O silício (Si), elemento chave para a resistência e durabilidade do cimento, apresentou alta concentração no arroz carbonizado (76,808%) e no arroz em pó (65,956%), sugerindo seu potencial como fonte alternativa. O cálcio (Ca), essencial para a formação de compostos cimentícios, foi predominante no bambu (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.

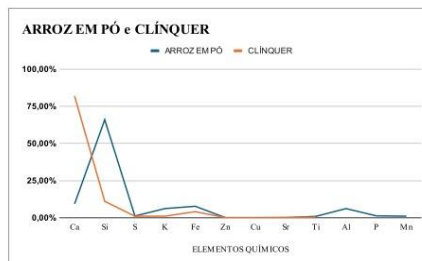
Figuras 1 e 2: Resultados da Análise do EDX-720 para a cinza do bambu e clínquer



Fonte: Elaboradas pelo autor

Figuras 3 e 4: Resultados da Análise do EDX-720 para arroz em pó e clínquer

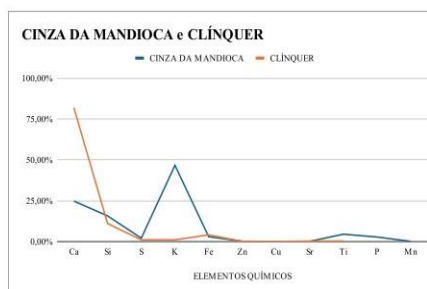
ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	ARROZ EM PÓ	CLÍNQUER
Ca	9,30%	81,95%
Si	65,96%	11,04%
S	1,19%	1,05%
K	6,20%	1,07%
Fe	7,73%	4,11%
Zn	0,07%	0,08%
Cu	0,07%	0,07%
Sr	0,01%	0,29%
Ti	0,94%	0,35%
Al	6,17%	---
P	1,30%	---
Mn	1,07%	---



Fonte: Elaboradas pelo autor

Figuras 5 e 6: Resultados da Análise do EDX-720 para cinza da mandioca e clínquer

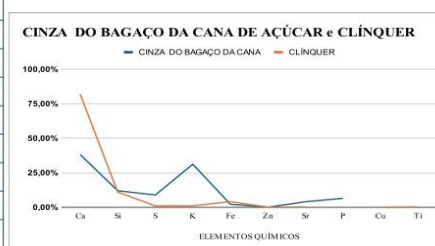
ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	CINZA DA MANDIOCA	CLÍNQUER
Ca	24,82%	81,95%
Si	15,69%	11,04%
S	2,08%	1,05%
K	46,71%	1,07%
Fe	3,00%	4,11%
Zn	0,19%	0,08%
Cu	0,05%	0,07%
Sr	0,13%	0,29%
Ti	4,51%	0,35%
P	2,78%	---
Mn	0,13%	---



Fonte: Elaboradas pelo autor

Figuras 7 e 8: Resultados da Análise do EDX-720 para a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e clínquer

ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	CINZA DO BAGAÇO DA CANA	CLÍNQUER
Ca	38,19%	81,95%
Si	12,00%	11,04%
S	8,89%	1,05%
K	31,19%	1,07%
Fe	2,26%	4,11%
Zn	0,08%	0,08%
Sr	0,04	0,29%
P	6,52%	---
Cu	---	0,07%
Ti	---	0,35%

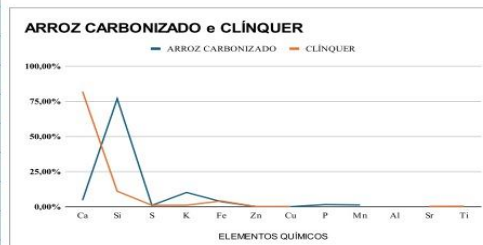


Fonte: Elaboradas pelo autor



Figuras 9 e 10: Resultados da Análise do EDX-720 para arroz carbonizado e clínquer

ELEMENTOS QUÍMICOS	RESULTADOS	
	ARROZ CARBONIZADO	CLÍNQUER
Ca	4,66%	81,95%
Si	76,81%	11,04%
S	0,99%	1,05%
K	10,17%	1,07%
Fe	3,61%	4,11%
Zn	0,06%	0,08%
Cu	0,06%	0,07%
P	1,53%	...
Mn	1,26%	...
Al	0,39%	...
Sr	...	0,29%
Ti	...	0,35%



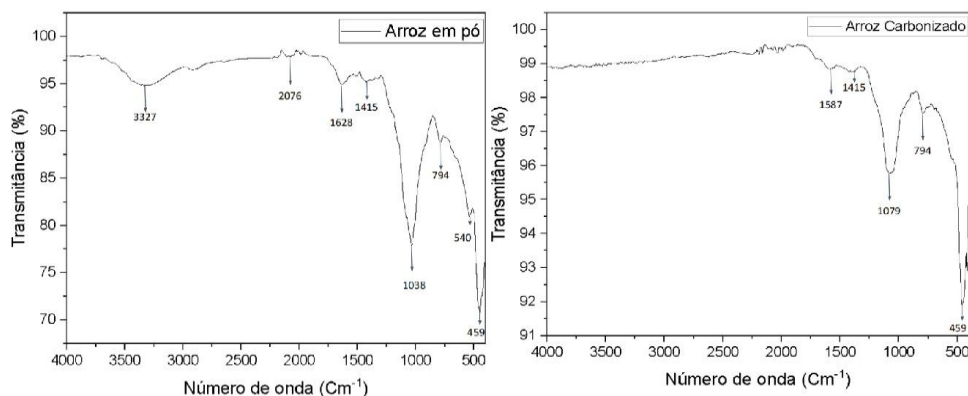
Fonte: Elaboradas pelo autor

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.

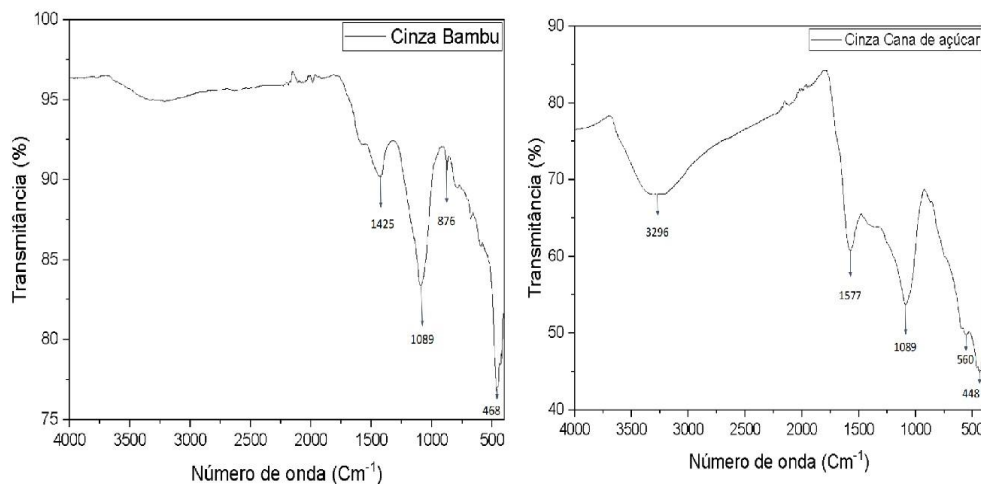
Figuras 11 e 12: Espectro de FT-IR para as amostras de arroz em pó e arroz carbonizado



Fonte: Elaboradas pelo autor

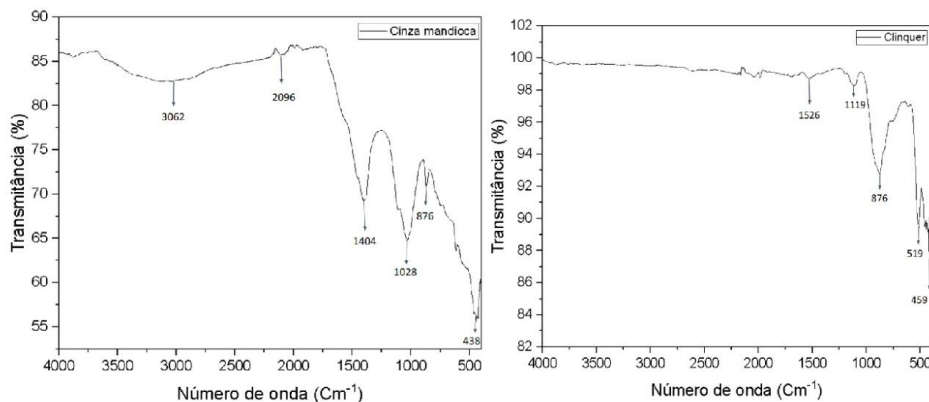


Figuras 13 e 14 : Espectro de FT-IR para as amostras de cinza do bambu e cinza da cana de açúcar



Fonte: Elaboradas pelo autor

Figuras 15 e 16 : Espectro de FT-IR para as amostras de clínquer e cinza da mandioca



Fonte: Elaboradas pelo autor

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 (SOCRATES, 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 17: 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 18: 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 Climplent, 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.

É importante ressaltar que todas as biomassas possuem compatibilidade química com o clínquer e podem ser utilizadas em menor proporção em suas formulações. Ao trabalhar com quatro tipos de biomassas, nossa pesquisa abrange diversas formulações, possibilitando a exploração de diferentes alternativas. Embora essas formulações preliminares forneçam uma base sólida para garantir uma solidificação eficaz e uma hidratação rápida, elas não substituem os testes físicos detalhados que ainda serão realizados, essenciais para garantir a qualidade do material cimentício. A tabela a seguir apresenta as formulações testadas.



Figuras 19: Formulações com diferentes proporções de clínquer e biomassas, destacando a hidratação e a consistência após 24 horas.

Composição	Proporção (%)	Hidratação	Observação após 24 horas
Clinquer 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: Elaboradas pelo autor

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas experiências e resultados obtidos até o momento espera-se que o projeto resulte na identificação e na formulação de um composto de biomassas que possa ser utilizado como substituto parcial do clínquer na produção de cimento, mantendo ou melhorando as propriedades físicas e mecânicas do material final.

Uma vez estabelecida uma formulação adequada que cumpra todos os princípios químicos e físicos exigidos, planeja-se incluir outros ensaios, além de impulsionar a fabricação de blocos de concreto. Essas medidas adicionais irão ampliar o processo de descarbonização no mercado da indústria cimenteira.

REFERÊNCIAS

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 fíler 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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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/GqB7NmLvrNqNYwVdXqj7hjq/> . 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.

SOCRATES, George . **Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies**, John Wiley & filhos , LTDA , 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.

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.