



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUOS
AGRÍCOLAS EM ARGAMASSAS**

SAMARA DE MORAIS COELHO

Prof. Dr. Matheus Tabata Santos

Prof. Ma. Hanaelly Garcia do Carmo

PUBLICAÇÃO:

ANÁPOLIS

2022

SAMARA DE MORAIS COELHO

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUOS
AGRÍCOLAS EM ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil
da Mobilidade do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis,
como requisito parcial para conclusão de curso.

Orientador(a): Prof. Dr. Matheus Tabata Santos
Coorientador(a): Prof. Ma. Hanaelly Garcia do
Carmo

ANÁPOLIS, 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Coelho, Samara de Moraes

C672a

Análise da substituição do cimento Portland por resíduos agrícolas em argamassas. / Samara de Moraes Coelho. – Anápolis: IFG, 2022.

39 f. il. color.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Tabata Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2022.

1. Cinza de casca de arroz. 2. cinza da casca do coco verde.
3. cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 4. argamassa 5. construção. I. Santos, Matheus Tabata (orient.). II. Carmo, Hanaelly Garcia do (coorient.). III. Título.

CDD 624



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 18/2022.2

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No 6º dia do mês de dezembro do ano de dois mil e dois, às 15:10 horas foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Graduando (a) **Samara de Moraes Coelho (matricula 20171060130088)** do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Matheus Tabata Santos, Hanaelly Garcia do Carmo Hilário, Natália Gonçalves Torres e Alexandre Lopes Borges, sob a presidência do segundo. O trabalho de conclusão de curso tem como título "**Análise da substituição do cimento Portland por resíduos agrícolas em argamassas**", da área de Construção Civil, sob orientação do Prof. Matheus Tabata Santos e coorientação da Profa. Hanaelly Garcia do Carmo Hilário. Após a apresentação, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 77 (Setenta e sete pontos) e o Trabalho de Conclusão de Curso foi considerado (X) aprovado () aprovado com correções () reprovado pela banca examinadora.

Encerra-se a presente sessão às 16 horas e 07 minutos. Eu, Prof. Matheus Tabata Santos, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

Prof. Matheus Tabata Santos

(Assinado eletronicamente)

Profa. Hanaelly Garcia do Carmo

(Assinado eletronicamente)

Profa. Natália Gonçalves Torres

(Assinado eletronicamente)

Alexandre Lopes Borges

Prof. Alexandre Lopes Borges

(Assinado eletronicamente)

Samara de Moraes Coelho

Samara de Moraes Coelho
(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Natalia Goncalves Torres, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 08/12/2022 20:20:40.
- **Matheus Tabata Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/12/2022 08:28:25.
- **Hanaelly Garcia do Carmo, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 06/12/2022 19:57:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 352802
Código de Autenticação: 5b4ca10d37



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Samara de Moraes Coelho

Matrícula: 20171060130088

Título do Trabalho: Análise da Substituição do Cimento Portland por Resíduos Agrícolas em Argamassas

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

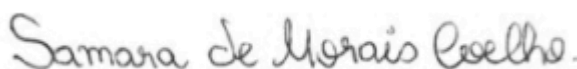
O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 05/01/2022.

Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

RESUMO

O uso do cimento Portland é bastante comum e até mesmo considerado essencial na execução da construção civil no Brasil. Apesar de ser muito utilizado e estar constantemente presente nas construções apresentando inúmeras vantagens em relação a resistência, trabalhabilidade e também na facilidade de compra em casas de construção, a fabricação do cimento Portland acaba gerando efeitos negativos em relação ao meio ambiente, pois no processo de sua produção ocorre a extração de rochas calcárias e de argila, o que causa certo impacto ambiental e também acaba gerando resíduos provenientes desse processo de fabricação. Outro impacto relacionado ao cimento é a queima de carvão durante o processo de calcinação de calcário, que emite grande quantidade CO_2 na atmosfera. O uso de outros materiais, como os resíduos agrícolas substituindo o cimento Portland nas construções vem crescendo bastante com o passar do tempo e, principalmente, com a constante valorização de métodos que tenham o mínimo de impacto ambiental possível. A procura pela substituição do cimento Portland se tornou popular e vem apresentando cada vez mais pesquisas relacionadas ao tema, destacando pontos importantes que tornam vantajosa ou não uma substituição. No presente trabalho foi abordado especificamente a substituição do cimento *Portland* por resíduos agrícolas em argamassas. Os resíduos foram selecionados a partir de uma revisão sistemática da literatura, utilizando termos específicos de busca sobre o tema na base de dados adotada. Após a seleção de documentos foi possível aplicar o modelo preditivo de sustentabilidade e vida útil para estabelecer de acordo com a melhora apresentada em relação à argamassa de referência, qual resíduo substitui o cimento Portland apresentando as melhores características. Dentre os resíduos agrícolas analisados em substituição ao cimento Portland foram a cinza de casca de coco verde (CCV) em teor 10%, cinza da casca de arroz (CCA) em 20% e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) também em teor de 20% na substituição do cimento, que foram analisados considerando suas características e funcionalidades ao serem utilizados em argamassas na construção civil, buscando sempre resultados similares aos obtidos com o cimento Portland e visando vantagens econômicas e ambientais. Dessa maneira, o resíduo agrícola que apresentou o melhor desempenho após a utilização do modelo preditivo de sustentabilidade foi o CCA20 em relação à argamassa de referência estudada.

Palavras-chave: Cinza da casca de arroz. Cinza da casca do coco verde. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Construção.

ABSTRACT

The use of Portland cement is quite common and even considered essential in the execution of civil construction in Brazil. Despite being widely used and constantly present in constructions, presenting numerous advantages in relation to resistance, workability and also ease of purchase in construction houses, the manufacture of Portland cement ends up generating negative effects in relation to the environment, because in the process of construction its production is caused by limestone and clay rocks, which causes a certain environmental impact and also ends up generating waste from this manufacturing process. Another impact related to cement is the burning of coal during the limestone calcination process, which emits large amounts of CO₂ into the atmosphere. The use of other materials, such as agricultural residues replacing Portland cement in buildings, has grown a lot over time and, mainly, with the constant preservation of methods that have the least possible environmental impact. The demand for replacing Portland cement has become popular and has been presenting more and more research related to the subject, highlighting important points that make a replacement advantageous or not. In the present work, it was specifically the replacement of Portland cement by agricultural residues in mortars. Residues were selected from a systematic review of the literature, using specific search terms on the topic in the adopted database. After selecting documents, it was possible to apply the predictive model of sustainability and useful life to establish, according to the transmission in relation to the reference mortar, which residue replaces Portland cement with the best characteristics. Among the agricultural residues analyzed in place of Portland cement were green coconut husk ash (CCV) at 10% content, rice husk ash (RCA) at 20% and sugarcane bagasse ash. (CBC) also at a 20% content in the replacement of cement, which were analyzed considering their characteristics and functionality when used in mortars in civil construction, always seeking results similar to those obtained with Portland cement and environmental and environmental benefits. Thus, the agricultural residue that presented the best performance after using the predictive model of sustainability was the CCA20 in relation to the tested reference mortar.

Keywords: Rice husk ash. Ash from the shell of the green coconut. Ash from sugarcane bagasse. Construction.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
CBC	Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CCV	Cinza da Casca de Coco Verde
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MtCO ₂ e	Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre umidade relativa e grau de carbonatação.....	11
Figura 2 - Emissão de CO ₂ e no setor de resíduos (1990 a 2020).....	14
Figura 3 - Fluxograma das etapas de pesquisa.....	21

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Índice e-CO ₂ aos 28 dias	27
Gráfico 02 - Índice e-Energia aos 28 dias.	28
Gráfico 03 - Índice e-Recursos aos 28 dias.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Seleção preliminar de documentos para estudo.....	22
Tabela 2 - Documentos selecionados e as características apresentadas	23
Tabela 3 - Dióxido de carbono incorporado (e-CO ₂), consumo de energia incorporado (e-Energia) e consumo de recursos primários das matérias primas (e-Recursos).....	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de exclusão de documentos	20
Quadro 2 - Documentos selecionados para aplicação do modelo preditivo.....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 ANÁLISE DA CONSTRUÇÃO CIVIL E SEUS IMPACTOS	16
3.1.1 OS EFEITOS GERADOS PELO USO DO CIMENTO PORTLAND.....	17
3.2 USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS SUBSTITUINDO O CIMENTO PORTLAND	17
4 METODOLOGIA.....	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
6 CONCLUSÃO.....	30
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
ANEXO A.....	10

1 INTRODUÇÃO

Os estudos referentes a substituição do cimento Portland por resíduos gerados no meio agrícola são inúmeros e buscam sempre destacar as vantagens encontradas para realização dessa substituição. Nesse contexto uma das principais vantagens é a não inclusão da mineração em seu processo produtivo, já que esse método se trata de uma exploração extremamente impactante ao meio ambiente, porém necessária para a produção do cimento Portland.

A indústria produtora de cimento é responsável por grande parte da emissão de CO₂ (dióxido de carbono) no mundo. Desse modo, a redução do uso do cimento através da sua substituição por materiais provenientes do meio agrícola auxilia no controle da emissão de CO₂, que é um dos principais gases de efeito estufa (GEE), além de dar um novo destino a materiais de difícil descarte e/ou reutilização (CARRASCO-MALDONADO *et al.*, 2016).

Atualmente, metade do CO₂ emitido durante a fabricação de cimento é originária do processo de calcinação do calcário, sendo que a outra metade dos gases emitidos se dividem entre queima de combustível, processos relacionados ao transporte e a utilização de energia elétrica (FARIA, 2018).

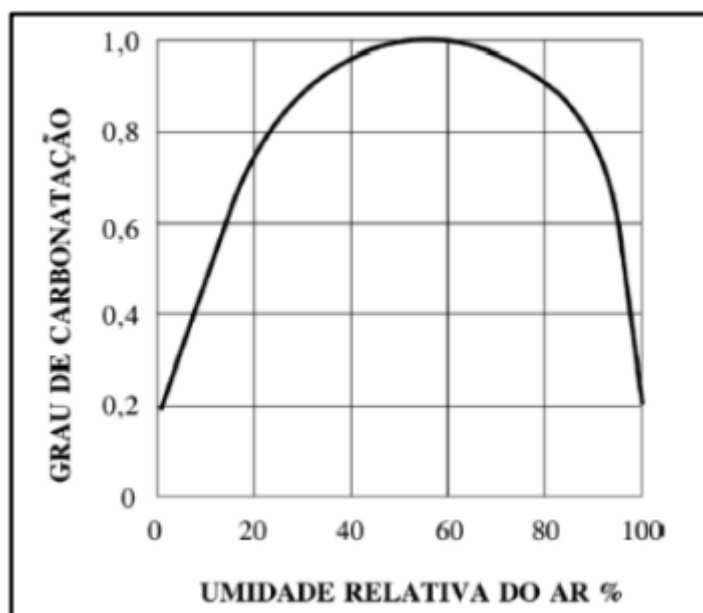
Também é possível destacar a influência exercida pelo alto índice de emissão de CO₂ na construção civil, pois o excesso de CO₂ na atmosfera afeta diretamente as estruturas de concreto armado ao contribuir com o fenômeno de carbonatação, favorecendo o processo de corrosão e reduzindo a vida útil das edificações.

A carbonatação é um fenômeno bastante estudado que desencadeia manifestações patológicas preocupantes na construção civil, acometendo estruturas de concreto armado de modo que afeta sua vida útil, reduzindo a alcalinidade do concreto que antes era constituído por Hidróxido de Cálcio (Ca (OH)₂) e passa a ser composto somente por Carbonato de Cálcio (CaCO₃). Essa condição ocorre principalmente pelo conjunto de alta concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa do ar, condições de exposição, qualidade do concreto e pela execução. Desse modo, considerando o impacto que pode ser gerado nas estruturas pelo alto índice de CO₂ na atmosfera, a obtenção de certo controle na emissão de CO₂ também é de interesse da construção civil, apesar da captura de carbono pelo concreto ser algo benéfico em determinado teor (SOUZA, 2019).

O processo de carbonatação tem relação direta com a umidade do ar, que contribui fortemente para que o CO₂ adentre nas estruturas através da difusão do gás e da porosidade apresentada pelo concreto. Como é apresentado na Figura 1 a seguir, quanto maior for o nível de umidade presente no ar, maior é o avanço do processo de carbonatação na estrutura até atingir

o seu valor máximo e começar a estabilizar o grau de carbonatação com o aumento da umidade relativa do ar.

Figura 1 - Relação entre umidade relativa e grau de carbonatação



Fonte: CAMPOS, 2018

Portanto, realizar uma análise da viabilidade de resíduos agrícolas como substituição ao cimento Portland é um tema extremamente pertinente para a redução da emissão de CO₂ que é ocasionada pelo seu processo produtivo, além da aplicação de resíduos que seriam descartados muitas vezes de maneira incorreta no solo e a partir disso ganham um novo destino.

Dentre os principais estudos encontrados relacionados ao uso de resíduos agrícolas aptos a serem inseridos em argamassas como forma de substituição ao cimento, são encontradas várias pesquisas referentes a cinza do bagaço de cana de açúcar (CBC) e a cinza da casca de arroz (CCA), por exemplo. Por serem resíduos que geralmente aparecem com facilidade em pesquisas, ainda que superficiais sobre o tema, é possível ter uma base em relação a viabilidade de utilização de resíduos agrícolas a partir destes, considerando que o notável interesse na realização de experimentos e estudos referentes a CBC e CCA pode ser classificado como um indicador do sucesso obtido em sua utilização.

Além da relevância em pesquisas, também é possível destacar a abundância apresentada na produção relacionada a CBC, considerando a alta demanda gerada pela indústria sucroalcooleira pelo fato do Brasil ser o maior produtor mundial de açúcar e álcool, além de também ser mundialmente o maior exportador de açúcar, o que consequentemente acaba

gerando e deixando disponível grande quantidade de bagaço da cana-de-açúcar (DE PAULA *et al.*, 2009). Já referente a CCA, é possível destacar que é um resíduo considerado abundante, pois para cada tonelada de arroz em casca, 23% correspondem a casca em si e 4% a cinzas. A casca de arroz também é considerada um problema ambiental quando depositada em grande quantidade e ocorrendo a eventual queima e dispersão de cinzas, além de ser um material de biodegradação considerada lenta (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

Em relação a produção de cinzas especificamente, destaca-se que entre os principais cereais tem-se a casca de arroz com 23%, representando o maior percentual de produção, seguida pelo bagaço da cana de açúcar com 15%, a palha do arroz com 14%, a folha do milho com 12%, as folhas e talo do girassol com 11% e as folhas do trigo com 10% das cinzas geradas (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

O Brasil é considerado um dos maiores produtores agrícolas, o que ocorre principalmente por fatores como a disponibilidade de áreas para cultivo, sua rica biodiversidade, condições climáticas locais favoráveis à agricultura no geral e também pela apresentação de tecnologia avançada, que o configura como um fornecedor de alto potencial de resíduos para o desenvolvimento de bioenergia (VIEIRA, 2012). Considerando a biodiversidade apresentada pelo Brasil em relação aos resíduos agrícolas gerados, o bioprocessamento destes é de grande interesse tanto econômico quanto social.

Os resíduos abordados apresentam ótimos números referentes à produção no âmbito nacional. De acordo com o IBGE através de dados referentes ao ano de 2021, é possível citar primeiramente a cana-de-açúcar, que teve uma produção de mais de 715.659.212 toneladas no ano, enquanto o arroz teve 11.660.603 de toneladas produzidas e o coco teve a produção de 1.638.573 mil frutos, com rendimento médio de 8.791 frutos/ha. Considerando a produção anual apresentada por cada um, é importante destacar a quantidade de resíduos gerados por cada um dos elementos analisados.

Por ser um dos resíduos com a maior produção, estima-se que sejam gerados cerca de 280 kg de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar, com produção de resíduos entre 7 e 13 toneladas por hectare. Enquanto o arroz, sendo uma das produções mais abundantes no meio agrícola gera para cada hectare de arroz produzido cerca de 4 a 6 toneladas de resíduos (VIEIRA, 2012).

Os resíduos agrícolas foram selecionados a partir de uma revisão sistemática da literatura, que demonstra a relevância de determinado material em relação ao tema, considerando o estudo de diversos documentos mostrando como sua utilização pode ser

considerada vantajosa. A revisão sistemática de literatura (RSL) é um método utilizado para mapear trabalhos publicados em uma determinada linha de pesquisa, permitindo uma avaliação das pesquisas realizadas dentro do tema e comparação de resultados obtidos (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho, apoiado na execução de uma revisão sistemática da literatura, busca levantar e analisar os dados relacionados às características e desempenho apresentados pelos resíduos agrícolas quando inseridos em argamassas. Desse modo, o objetivo explorado é o de estabelecer os principais resíduos agrícolas utilizados em substituição ao cimento Portland em argamassas, ao destacar e estabelecer o resíduo mais indicado para tal a partir de suas características e resultados apresentados.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir os resultados esperados, o trabalho foi dividido nos seguintes objetivos:

- Selecionar os resíduos que substituam o cimento Portland em argamassas e utilizar os que possuam informações consideradas suficientes para a aplicação do modelo preditivo de sustentabilidade seguido;
- Levantar a partir dos dados encontrados nos documentos quais as características mais relevantes para a argamassa em cada resíduo agrícola a ser estudado, a partir do interesse na redução de impactos ambientais e da presença de dados considerados necessários para a análise no documento através na revisão sistemática de literatura;
- Comparar as características dos resíduos selecionados por sua relevância em informação e definir qual material melhor atende as expectativas referente ao modelo preditivo de sustentabilidade quando utilizado em argamassas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o avanço da tecnologia e com o aumento do crescimento populacional, as práticas agrícolas, juntamente com industrialização se encontram cada vez mais intensivas. Analisando-se bem, esse fator é capaz de destacar o uso predominante de energia associada a fontes de combustíveis fósseis que vêm aumentando os índices de emissões de CO₂ (FARIA, 2018).

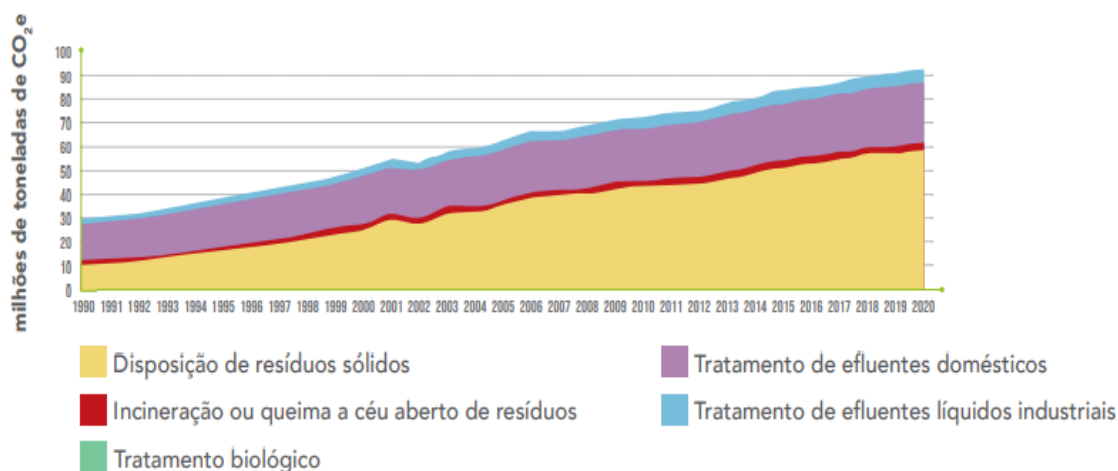
Segundo dados do WMO (2017) desde o início do período industrial no século XVIII até 2016, houve um crescimento de aproximadamente 145% nas emissões globais de CO₂, o que afeta negativamente e gera reflexos em todo o mundo.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o uso de resíduos agrícolas em substituição ao cimento Portland, especialmente referente ao desempenho demonstrado por estes ao serem inseridos em argamassas. A análise foi realizada através da comparação dos dados obtidos por meio de uma revisão sistemática de documentos relacionados ao tema, aplicando um modelo preditivo de sustentabilidade para analisar informações referentes a emissão de CO₂, energia e recursos empregados na produção de argamassas com substituição do cimento e assim avaliar sua aplicabilidade na construção civil.

Em 2020, o setor de geração de resíduos foi responsável pela emissão de cerca de 92 milhões de toneladas de CO₂, com um aumento de 1,8% em relação à 2019. Enquanto isso a indústria produtora de cimento foi responsável pela emissão de 22 milhões de toneladas de GEE em 2020, atingindo um crescimento de 7,6%. Já as emissões realizadas pela queima dos resíduos florestais representam 7% das emissões do setor de mudança de uso de terra e florestas, o que equivale a 66 MtCO₂e de acordo com o SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa). A Figura 2 a seguir demonstra a emissão de milhões de toneladas de CO₂e e seus respectivos setores geradores de resíduos.

De acordo com a Figura 2 é possível destacar a grande quantidade de resíduos sólidos e os resíduos que são resultado de incineração que emitem CO₂ ao longo dos anos, em um período compreendido entre 1990 e 2020, além do aumento constante da emissão apresentada que é notável no decorrer dos anos.

Figura 2 – Emissão de CO₂e no setor de resíduos (1990 a 2020)



Fonte: POTENZA *et al* (2021)

O estudo de resíduos visando a substituição do cimento Portland na construção civil tem crescido bastante e esse interesse ocorre pela consciência dos impactos gerados através da construção civil e que, muitas vezes estão atrelados ao processo produtivo do cimento Portland e sua influência ao meio ambiente. Buscando uma redução nesse impacto gerado, assim como, para garantir um destino a determinados resíduos que seriam dificilmente descartados ou reutilizados, pesquisas relacionadas ao tema vêm crescendo constantemente.

Os resíduos agrícolas que possuem grande quantidade de pesquisas relacionadas ao seu uso, observando-se mesmo que de maneira superficial, são as cinzas de casca de arroz e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Tais resíduos são produzidos em alta quantidade, considerando a grande demanda gerada pela indústria. Além dos resíduos agrícolas serem considerados um recurso renovável, sua extração e utilização consiste no reaproveitamento de um material considerado nocivo que normalmente seria desprezado. É importante ressaltar também que a substituição do cimento Portland por resíduos do meio agrícola é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um produto com maior valor agregado sem que sejam produzidos novos resíduos (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura organizacional deste trabalho foi definida a partir de 6 capítulos e seus subtítulos aqui compreendidos. O primeiro capítulo do trabalho foi responsável por abordar de forma sucinta a introdução ao tema, destacando assim os principais pontos introdutórios ao trabalho.

O item 1.1 apresenta os principais objetivos estabelecidos para realização deste estudo, subdividindo-se em 1.1.1 em objetivos gerais e 1.1.2 com objetivos específicos, enquanto o item 1.2 foi utilizado para discorrer sobre a justificativa da realização da análise, apresentando os principais pontos escolhidos como motivação para o estudo do tema. Já o capítulo 2, que é o atual capítulo, apresenta a divisão dos tópicos abordados no trabalho.

O capítulo três é constituído pelo referencial teórico, e neste capítulo também contém informações sobre os estudos relacionados ao tema escolhido, seguindo em 3.1 analisando a construção civil e seus impactos, e os efeitos do cimento em 3.1.1. No item 3.2 é abordado o uso de resíduos agrícolas em substituição ao cimento Portland.

A metodologia científica adotada para realização do estudo está disposta no capítulo 4, seguida dos capítulos 5 e 6, que tratam respectivamente de apresentar os resultados obtidos no

trabalho mostrando a viabilidade da aplicação da metodologia após a análise dos documentos e realizar as considerações finais do trabalho, expondo o que foi possível evidenciar com a pesquisa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ANÁLISE DA CONSTRUÇÃO CIVIL E SEUS IMPACTOS

Considerado um dos setores mais poluentes, a construção civil possui em todo seu processo produtivo notável impacto ambiental, desde a extração de matérias-primas a serem utilizadas para a produção de materiais construtivos até o descarte dos resíduos gerados após o processo. Sendo assim, todas as etapas envolvidas na construção civil geram muitos impactos, influenciando nos fatores ambientais, sociais e econômicos de maneira relevante em todo o mundo (OLIVEIRA, 2008).

O setor da construção civil é conhecido por desempenhar um papel importante na sociedade por meio de suas atividades. Com base nisso, e relacionado ao impacto ambiental gerado pela construção civil é necessário citar que o setor é responsável por cerca de 75% do consumo de matéria-prima extraída, além de ser encarregado pela emissão de grande parte dos gases causadores do efeito estufa, tornando o ramo o mais impactante ao meio ambiente (GASQUES *et al.*, 2014).

Em relação ao efeito gerado pela construção civil no quesito econômico, é importante salientar a sua relevância estratégica em relação aos impactos gerados diretamente na economia local. Além de ser um setor essencial para o crescimento econômico mesmo que indiretamente, o investimento em infraestrutura promove o desenvolvimento porque aumenta o retorno dos insumos e incentiva o investimento privado e o emprego (RIGOLON, 1997).

É notável o crescimento constante do setor da construção civil, e com esse desenvolvimento são destacados os impactos gerados por seus elementos constituintes, sendo o cimento Portland o principal material construtivo utilizado. A produção do cimento Portland ocorre em larga escala visto que o material é considerado essencial para a execução da construção civil considerando as características do mesmo, que o tornam o item com maior demanda de uso em construções. No entanto, muitos impactos e até mesmo danos à saúde de pessoas ligadas de maneira direta ou indireta ocorrem através da extração da matéria-prima a ser utilizada, causando mudanças na região próxima às fábricas e locais destinados à extração de minerais (MAURY; BLUMENSCHIN, 2012).

3.1.1 OS EFEITOS GERADOS PELO USO DO CIMENTO PORTLAND

Segundo GASQUES *et al.* (2014) é necessário ressaltar que o cimento possui um processo produtivo que tem sido destacado como causador de impactos ambientais e sociais geralmente relacionados às comunidades na região de entorno das fábricas, problemas no meio ambiente por questões relacionadas à saúde humana, como a contaminação de ar, água e solo.

A produção de cimento gera poluição atmosférica pois provoca a emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases mais poluentes e que contribui com o efeito estufa. Além desse grande impacto gerado na produção do cimento, também é necessário destacar a influência gerada pela instalação e utilização da indústria cimentícia em relação a moradores da região e de trabalhadores envolvidos na produção, que acabam sendo expostos ao material particulado suspenso gerado que é extremamente prejudicial à saúde (GASTRES *et al.*, 2014).

Apesar de não ser possível acabar completamente com os impactos gerados pela produção e utilização do cimento Portland, é possível minimizar o seu efeito através da diminuição de seu uso gerando uma menor demanda para a indústria cimentícia, o que pode ser implementado de maneira segura através da substituição parcial ou total do cimento Portland por outros elementos menos agressivos ao meio ambiente. Considerando que a construção civil é um setor que possui grande potencial para absorver e destinar resíduos, além dos impactos a serem observados na fabricação do cimento é possível considerar o reúso de resíduos agrícolas na construção civil como uma alternativa para preservar o meio ambiente. Desse modo é essencial realizar uma avaliação dos materiais a serem incorporados, buscando a durabilidade necessária para substituir o cimento Portland (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

A avaliação das características dos resíduos agrícolas pode ser realizada de forma comparativa através de uma revisão bibliográfica, buscando mapear os estudos já realizados anteriormente por outros autores e analisando os resultados obtidos de maneira sistemática (BRIZOLA; FANTIN, 2016).

3.2 USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS SUBSTITUINDO O CIMENTO PORTLAND

Considerando que a construção civil é um setor que possui grande potencial para absorver e destinar resíduos, além dos impactos a serem observados na fabricação do cimento é possível considerar o reúso de resíduos como uma alternativa para preservar o meio ambiente. Desse modo é essencial realizar uma avaliação dos materiais a serem incorporados, buscando a durabilidade necessária para substituir o cimento Portland (FARIA, 2018).

Ao procurar por um desenvolvimento sustentável no ambiente construtivo, se torna primordial a busca pelo uso de métodos para a execução do reúso de resíduos gerados por determinada indústria, a fim de substituir matérias-primas essenciais em outro setor, como por exemplo o da construção civil, reduzindo dessa forma o impacto ambiental gerado por ambos os setores (COUTINHO, 2011).

Dentre os resíduos mais conhecidos na substituição do cimento Portland, destacam-se como exemplo os que são produzidos no meio agrícola, os resíduos provenientes de indústrias dos mais diversos ramos e até mesmo os que são gerados no próprio processo construtivo. Uma das formas mais comuns dos resíduos agrícolas em substituições é na forma de cinzas, sendo geralmente utilizadas como uma adição mineral, que é o caso da cinza da casca de arroz e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo. Por apresentarem alto teor de sílica, esses resíduos proporcionam alta reatividade e grande melhoria nas propriedades mecânicas e físicas do material (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

Segundo Gluitz e Marafão (2013), a utilização dos resíduos gerados pelo setor agroindustrial, pode ser considerada vantajosa para a construção civil, pois o mesmo consegue reduzir a utilização de matérias-primas não renováveis que são necessárias para os elementos construtivos a serem executados ao serem incorporados nos mesmos. Além disso, novos materiais são gerados atendendo a demanda de produtos sustentáveis e com maior economia.

Deste modo, a utilização de resíduos gerados em outros setores na indústria da construção civil pode-se tornar vantajosa devido à redução do emprego de matérias-primas não renováveis que são necessárias às atividades da construção civil. Grande parte desse resíduo gerado pode ser incorporada, de modo a produzir novos materiais de construção que sejam relativamente econômicos e sustentáveis, atendendo à crescente demanda que atualmente exige esta área (GLUITZ; MARAFÃO, 2013).

Além de dar uma novo destino para os resíduos que geralmente possuem difícil descarte, a utilização de cinzas de elementos agrícolas também é uma alternativa para solucionar a questão ambiental da disposição de cinzas no meio ambiente ao inseri-las em um material a ser utilizado (BUI; HU; STROEVEN, 2005).

Tendo isso como base, realizar uma análise das características dos resíduos em relação a função a ser desempenhada auxilia na definição do resíduo que deverá ser aplicado e define a quantidade a ser utilizada para obtenção de resultados satisfatórios, classificando desse modo se a substituição poderá ocorrer de maneira parcial ou total. Dentre os resíduos mais conhecidos se destacam as cinzas minerais geradas através de diferentes atividades agroindustriais, que

apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, o que dá a possibilidade de serem então utilizadas como pozolanas. A propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio que é liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

4 METODOLOGIA

A metodologia escolhida para realizar o estudo e apresentar uma análise do tema proposto é a de revisão sistemática de literatura. Elaborada através de documentos já existentes, a análise da aplicabilidade de resíduos agrícolas em substituição ao cimento Portland em argamassas se deu por meio de uma revisão sistemática, realizando uma avaliação de artigos publicados no Brasil com dados relacionados ao tema, apresentando informações como a resistência a compressão das amostras, a absorção de água apresentada e o índice de consistência (*Flow Table*).

O presente estudo buscou estabelecer por meio de pesquisas na base de dados estabelecida quais os resíduos agrícolas mais utilizados na construção civil, considerando a quantidade de material encontrado e os resultados demonstrados por estes, quando utilizados, levando a reflexão da viabilidade de uso dos mesmos substituindo de maneira parcial ou total o cimento Portland. A maior parte dos estudos encontrados inicialmente sobre o tema foram referentes ao CCA e CBC, sendo também bastante comum estudos referentes a camas sobrepostas de suínos, que também são produzidas com casca de arroz.

Primeiramente foi elaborado um protocolo para definir os métodos a serem utilizados para busca de publicações, procedimentos relacionados a seleção e métodos de seleção e extração de arquivos, além de métodos para realização da análise dos dados encontrados. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa com o objetivo de identificar quais os resíduos que aparecem de maneira mais relevante quando relacionados ao uso em argamassas substituindo o cimento Portland, dessa maneira pôde ser delimitado quais os resíduos a serem considerados na pesquisa.

Foram considerados os artigos nacionais que tiveram sua publicação no período compreendido entre 2000 e 2022 para obtenção de dados, sendo utilizados os documentos que se enquadraram nesse quesito, de maneira inicial, e sendo excluídos da análise os documentos que não seguiram o tema completamente e/ou se encontraram fora do período definido para estudo.

A elaboração da análise foi realizada no decorrer das seguintes etapas: identificação do objeto de estudo; definição da base de dados a ser considerada; escolha de *strings* de pesquisa; adoção de critérios para exclusão e inclusão de documentos na análise; avaliação dos estudos incluídos na revisão; apresentação de informações e resultados obtidos por meio da revisão.

De acordo com o Quadro 2, foram estabelecidos os critérios para realizar a exclusão dos documentos encontrados em pesquisa que não se encontravam de acordo com os quesitos escolhidos, refinando desse modo a pesquisa, reduzindo os documentos a serem analisados.

Quadro 1 – Critérios de exclusão de documentos

STRINGS	1° CRITÉRIO DE EXCLUSÃO	2° CRITÉRIO DE EXCLUSÃO	3° CRITÉRIO DE EXCLUSÃO
Resíduos agrícolas AND Substituição OR Substituindo AND Cimento AND Argamassa	Artigos	Palavras-chave	Leitura de resumo
		Leitura de título	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A princípio tem-se a questão estabelecida como base do trabalho, que demonstra a relevância da presente pesquisa, além de auxiliar na escolha dos termos de pesquisa: “Quais são os resíduos agrícolas utilizados em substituição ao cimento Portland em argamassas com melhor desempenho?”.

A pesquisa de tema foi realizada na base de dados com acesso livre do Portal de Periódicos CAPES, utilizando o software EndNote para execução da importação das referências dos documentos encontrados na pesquisa. As *strings*, também conhecidas como descritores ou palavras-chave definidas para execução do mapeamento dos estudos de interesse foram: “resíduos agrícolas AND substituição OR substituindo AND cimento AND argamassa”.

Para selecionar os arquivos de maneira mais criteriosa, foram excluídos também os artigos que não possuíam título ou resumo relacionado à substituição com resíduos agrícolas especificamente em argamassas, por fugirem do foco do estudo ao não se enquadrarem dentro da delimitação estabelecida do tema.

Após a seleção dos artigos compreendendo o tema escolhido e estabelecido com palavras-chave a serem verificados e considerados parâmetros da pesquisa, foi realizada uma busca baseada nos itens gerados no protocolo elaborado considerando a utilização dos resíduos

especificamente em argamassas, visando distinguir os melhores resultados. Na Figura 3 são apresentadas as etapas realizadas no decorrer da execução da análise de resíduos.

Figura 3 – Fluxograma das etapas de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho, na qual será realizada a discussão dos resultados e as conclusões. Após a pesquisa na base de dados definida foram encontrados no total 859 artigos relacionados ao tema, através da utilização das *strings*. Dentre estes, 145 documentos foram excluídos da pesquisa por se encontrarem duplicados, restando assim, 714 arquivos para serem analisados.

Foram excluídos da análise 677 artigos através da leitura de título e, em seguida, 22 artigos ao realizar a leitura do resumo do documento. Os resíduos foram abordados a partir da substituição do cimento Portland em argamassas. Desse modo, o número de artigos a serem adotados na análise foi novamente reduzido após a leitura de todo o documento selecionado ao demonstrar fuga do tema em questão, abordando uma substituição não aplicada a argamassas ou substituindo outro material que não seja o cimento Portland na composição.

Desse modo, a partir da leitura completa dos documentos foi realizada uma segunda seleção dos artigos, que reduziu ainda mais os estudos a serem considerados, pois inicialmente a partir da revisão sistemática foram lidos de forma completa 15 documentos para obter os dados necessários para a aplicação do modelo preditivo de sustentabilidade criado por Long,

Gao e Xie (2015), sendo constatado então que dentre estes haviam documentos que não possuíam as informações necessárias ou discorriam sobre a substituição de outro elemento na argamassa que não fosse o cimento. Sendo assim, 12 destes documentos também foram desconsiderados na avaliação, fazendo com que restassem apenas 3 documentos com informações suficientes para a aplicação do modelo preditivo e análise de dados. A Tabela 1 apresenta a quantidade de documentos excluídos a partir de cada critério elaborado e os documentos restantes para serem analisados.

Tabela 1 – Seleção preliminar de documentos para estudo

CRITÉRIOS	QUANTIDADE
Artigos selecionados inicialmente	859
Excluídos por duplicata	145
Excluídos por leitura de título	677
Excluídos por leitura de resumo	22
Excluídos por não se aplicar ao cimento	8
Excluídos por informações insuficientes	4
Artigos restantes para análise	3
Artigos aderentes	3

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar a revisão bibliográfica a partir da leitura dos documentos selecionados para a análise, foi possível obter informações relevantes para a verificação da aplicabilidade de determinados resíduos agrícolas em argamassas, como uma alternativa na substituição do cimento Portland de maneira que o impacto ambiental a ser gerado em sua utilização, incluindo sua produção através da extração de recursos naturais fosse diminuída ao máximo sem perder as propriedades necessárias. O Quadro 2 apresenta os documentos selecionados com ano de publicação e o resíduo estudado por cada autor.

Quadro 2 – Documentos selecionados para aplicação do modelo preditivo

AUTOR	ANO	RESÍDUO
Bezerra	2011	CCA (Cinza da casca de arroz)
Matos	2017	CCV (Cinza da casca de coco verde)
Mansaneira	2017	CBC (Cinza do bagaço da cana-de-açúcar)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficiência de um material ao ser aplicado como substituição está associada à habilidade da adição em operar as propriedades mecânicas, ao estado fresco e referente à

durabilidade, proporcionando aumento da resistência apresentada pela argamassa, melhorando aspectos relacionados ao consumo de água e redução de permeabilidade relatada.

Para aplicar o modelo preditivo de sustentabilidade desenvolvido por Long, Gao e Xie (2015) para avaliar o impacto gerado por m³ de concreto foi necessário realizar uma adaptação para estabelecer uma avaliação do possível impacto ambiental gerado pela utilização da argamassa com a inserção de resíduos agrícolas a partir de critérios específicos de avaliação. Os dados adotados para cada substituição são referentes aos 28 dias, pois foi a referência utilizada em comum entre os autores. A tabela 2 a seguir apresenta a melhora ocorrida entre as substituições estudadas.

Tabela 2 – Documentos selecionados e as características apresentadas

Critério analisado	Autor	RESÍDUO	% de melhora
Aumento na resistência a compressão aos 28 dias	Bezerra	CCA	20,00%
	Mansaneira	CBC	5,79%
	Matos	CCV	-7,03%
Absorção de água aos 28 dias	Matos	CCV	17,70%
Índice de consistência (<i>Flow table</i>)	Bezerra	CCA	2,39%
	Mansaneira	CBC	-5,0%
	Matos	CCV	-3,13%

Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações apresentadas na Tabela 2 foram obtidas através dos dados fornecidos pelos autores em suas respectivas pesquisas, ao analisarem as características do material no estado fresco e no estado endurecido para avaliarem o desempenho da argamassa com adição em relação à argamassa utilizada como referência. De acordo com os dados fornecidos é possível destacar a melhora apresentada na resistência à compressão com a utilização de CCA e CBC.

O resíduo apresentado por Matos (2017) foi o único a não apresentar melhora na resistência à compressão aos 28 dias na sua substituição, que demonstrou uma piora de 7,03% em relação a resistência apresentada pela argamassa de referência. Também é possível relacionar sua porosidade com a diminuição de resistência mecânica, uma vez que quanto mais poroso é um material menor é a resistência que este apresenta. Contudo, apesar de haver uma piora na resistência da argamassa ao utilizar o CCV, o fato não o desclassifica automaticamente do ramo de opções em substituição ao cimento Portland, considerando que a aplicação é referente a argamassas e estas não necessitam de elevados valores de resistência para serem utilizadas.

No estado fresco em relação à trabalhabilidade do material para realizar sua mistura, transporte e aplicação, as argamassas com adição de CCV se tornaram menos fluidas necessitando de uma maior quantidade de água na mistura, com uma baixa redução na densidade apresentada pela argamassa, pois o consumo de água está relacionado com a superfície específica apresentada pelas partículas, forma e quantidade acrescentada.

Outro fator apresentado foi a ausência de características pozolânicas pelo CCV, que não pode ser considerado como uma adição mineral pozolânica, pois de acordo com a NBR 12653 (2014) o material analisado deve conter sílica, ferro e alumina em níveis superiores a 70%, além de ser necessário possuir a finura necessária para registro de ação pozolânica. Apesar de não poder ser considerado material com atividade pozolânica, o autor do estudo do CCV em argamassas conclui que o material pode ser em adições de até 10% de substituição sem alterar de maneira significativa as propriedades apresentadas pela argamassa. O aplicação do teor de 10% de adição do CCV na argamassa resultou em uma leve redução na densidade apresentada pela massa da mistura realizada

Já os resíduos CCA20 E CBC20 registraram melhora relacionada a sua resistência à compressão ao fim dos 28 dias, ambas demonstrando não prejudicarem o desempenho da argamassa quando adicionados na mesma em proporções ideais de até 20% de substituição no volume de cimento Portland apresentado como referência. A melhora apresentada pelo CCA na argamassa está relacionada a reação que ocorre entre a cinza e o hidróxido de cálcio, que proporciona aumento da resistência e reduz a porosidade do material ao refinar seus poros, indicando reação pozolânica do resíduo.

Em relação a absorção de água apresentada pelas amostras de CCV10, as mesmas tiveram aumento de 17,70% em comparação com a argamassa de referência, considerando que essa informação vai de encontro com o fato de que quanto maior é a porcentagem da substituição maior a absorção por imersão, ocasionando como a redução da resistência à compressão da argamassa a cada aumento na adição de resíduo utilizado.

Referente ao potencial pozolânico apresentado pelos materiais, os documentos apresentam de maneira clara essa informação, de modo que o CCV foi considerado como um material sem caráter pozolânico após uma análise de desempenho aos 28 dias com o ensaio de Índice de Atividade Pozolânica de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014) e os requisitos destacados pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Em contrapartida, para avaliar o índice pozolânico do CCA foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 1992) e o resíduo apresentou um índice de atividade pozolânica superior ao valor esperado para ser considerado

um material pozzolânico. Do mesmo modo o CBC apresentou atividade pozzolânica no estudo realizado de maneira satisfatória ao ser avaliado de acordo com critérios estabelecido na NBR 12653 (ABNT, 2014).

Sendo o índice de consistência uma importante propriedade da argamassa ainda no estado fresco, utilizada para representar a tendência de deformação apresentada pela argamassa quando submetida a ação de cargas, tem-se que para a adição de CCV em até 10% e CBC em teor de até 20%, foi apresentada uma leve redução no valor obtido anteriormente na argamassa de referência de 3,13% e 5%, respectivamente, indicando um aumento na resistência ao escoamento na argamassa ao apresentar menor fluidez. Em contrapartida, o CCA20 teve aumento de 2,39% em sua consistência, demonstrando aumento na sua fluidez, diminuindo sua resistência ao escoamento.

Os documentos analisados não apresentaram outras informações relacionadas à características determinantes para o uso de argamassas, como por exemplo, dados relacionados à carbonatação, teor de ar incorporado, difusão de cloretos, entre outros fatores de análise. Desse modo, as propriedades utilizadas na avaliação das adições de resíduos em argamassas foram as apresentadas anteriormente, de acordo com as informações desenvolvidas nos documentos estudados.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes estabelecidos no modelo preditivo de sustentabilidade desenvolvido por Long, Gao e Xie (2015), relacionados aos aspectos ambientais da emissão de CO₂ (e-CO₂), o consumo de energia necessário (e-Energia) e as despesas realizadas com os recursos naturais (e-Recursos) em argamassas.

Tabela 3 Dióxido de carbono incorporado (e-CO₂), consumo de energia incorporado (e-Energia) e consumo de recursos primários das matérias primas (e-Recursos)

Item	e-CO ₂ (Kg/MPa.m ³)	e-Energia (MJ/MPa.m ³)	e-Recursos (Kg/MPa.m ³)
Cimento	0,83	4,727	1,73
Areia de rio	0,001	0,022	1,00
Água	0,0003	0,006	0,00
Superplastificante	0,72	18,3	0
Resíduo utilizado	0	0	0

Fonte: Long, Gao e Xie (2015).

No cálculo realizado não foi considerada a utilização de cal, por ainda não haverem estudos a fim de definir os índices de impacto de tal elemento no meio ambiente ao ser utilizado. Os resíduos agrícolas utilizados nas substituições também não possuem peso a ser considerado

nos cálculos, de modo que só serão considerados os pesos do cimento antes e depois da substituição, da areia e da água na avaliação de desempenho ambiental de cada argamassa.

Os critérios utilizados para realizar a análise foram as emissões de CO₂ (CI, índice e-CO₂), o consumo de energia (EI, índice e-Energia) e as despesas realizadas com a extração dos recursos naturais utilizados (RI, índice e-Recursos). Os índices CI, EI e RI foram obtidos através da fórmula desenvolvida por Long, Gao e Xie (2015), conforme as equações 7.1, 7.2 e 7.3 a seguir:

$$CI = \frac{CO2 \text{ incorporado } \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{fci \text{ (MPa)}} \quad (7.1)$$

$$EI = \frac{Energia \text{ incorporada } \left(\frac{MJ}{m^3}\right)}{fci \text{ (MPa)}} \quad (7.2)$$

$$RI = \frac{Recursos \text{ naturais incorporados } \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{fci \text{ (MPa)}} \quad (7.3)$$

Tendo como base o modelo preditivo de Long, Gao e Xie (2015) foi possível analisar os resíduos para definir dentre estes qual seria a opção mais adequada para a substituição do cimento Portland em argamassas, considerando assim os melhores resultados obtidos em cada estudo em relação a argamassa de referência. Os resíduos que mais se destacaram em relação aos resultados foram o CBC e CCA.

Inicialmente, como os estudos referentes a argamassas usualmente não trazem o quantitativo necessário de materiais para aplicação do modelo preditivo de sustentabilidade de Long, Gao e Xie (2015) em kg/m³, foi realizado um cálculo para que através do traço indicado no documento e de informações como a massa específica do material, o consumo de cada item por m³ pudesse ser definido com base no volume de argamassa para então analisar a sustentabilidade de cada substituição em relação a argamassa de referência. As equações 7.4 e 7.5 a seguir foram utilizadas para tal:

$$\left(\frac{M_{cim} \cdot \gamma_{cim}}{\gamma_{cim}}\right) : \left(\frac{M_{cal} \cdot \gamma_{cal}}{\gamma_{cim}}\right) : \left(\frac{M_{areia} \cdot \gamma_{areia}}{\gamma_{cim}}\right) \quad (7.4)$$

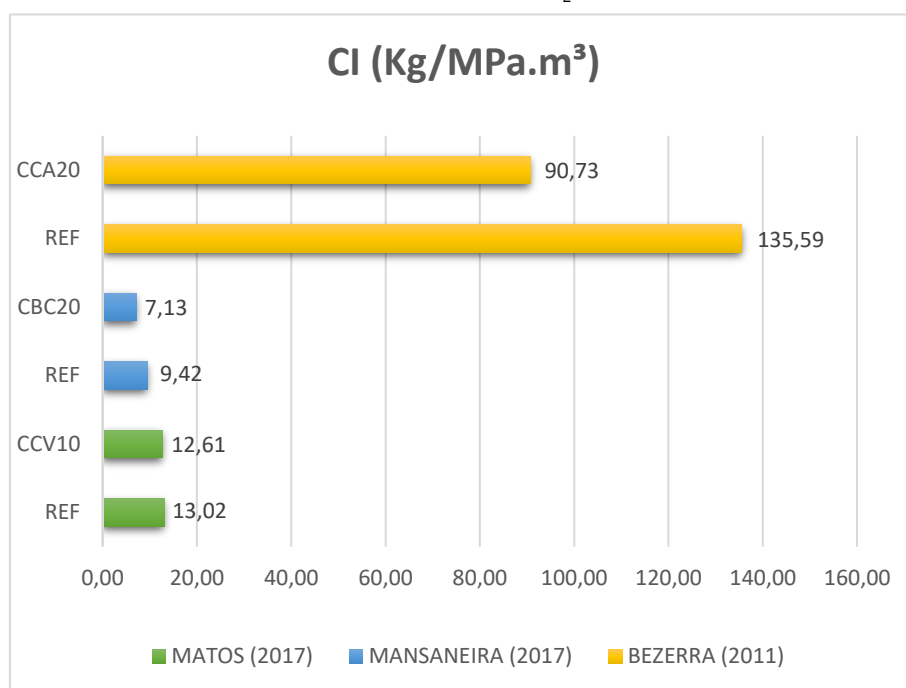
$$\frac{Massa}{Volume \text{ sólidos}} \quad (7.5)$$

O volume utilizado de cimento em cada traço estudado foi tomado como valor de referência para obter os outros dados necessários para a aplicação do modelo preditivo, como

o quantitativo de areia e água empregados na produção. Após o cálculo do consumo de argamassa por m³ aplicado nas argamassas que possuíam informações o suficiente para tal, foi possível utilizar o modelo preditivo de Long, Gao e Xie (2015) para comparar os dados das argamassas estudadas e suas respectivas substituições.

Nas Figuras a seguir é possível observar e comparar os resultados obtidos com as substituições em relação a argamassa de referência usando em sua composição 100% do cimento Portland por resíduos agrícolas no índice de CO₂ incorporado, índice de energia incorporada e índice de recurso natural primário incorporado. Os resíduos analisados foram o CCV, que é a cinza da casca de coco verde apresentada por Matos (2017) na proporção de 10%, a cinza de casca de arroz (CCA) com teor de 20% analisada por Bezerra (2011) e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) estudada por Mansaneira (2017) e utilizada em 20% da substituição. Os resultados obtidos em cada substituição aos 28 dias são apresentados a seguir de maneira comparativa nos devidos índices calculados.

Gráfico 1 – Índice e-CO₂ aos 28 dias



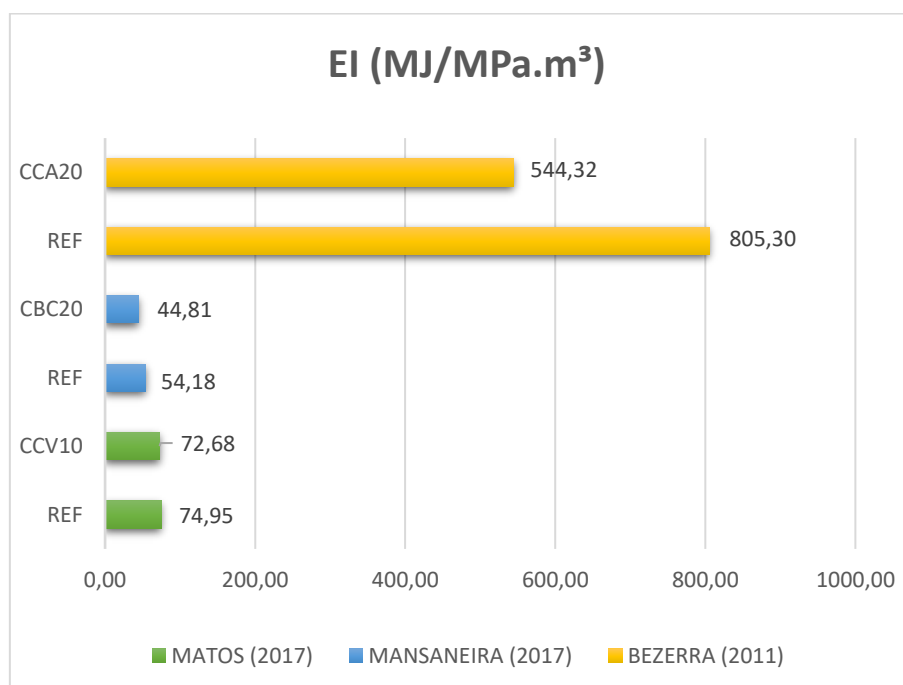
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do gráfico apresentado acima no Gráfico 1 é possível notar a grande redução que ocorreu na emissão de CO₂ ao ser realizada a substituição do cimento Portland em 20% por CCA. O resultado obtido aos 28 dias pelo CCA20 apresentou melhora de 33,08% em relação a argamassa de referência desenvolvida, chamada de REF, demonstrando assim que ao ser analisada no primeiro quesito referente ao seu desempenho relacionado ao meio ambiente a

substituição utilizando a cinza da casca de arroz é um resíduo viável quando o objetivo principal é a redução da emissão do CO₂ na atmosfera.

Como é exposto no Gráfico 1, é possível comparar os resultados obtidos com os distintos resíduos, sendo notável a diferença encontrada entre os índices e-CO₂ obtidos para a argamassa REF e a substituição CBC20 apresentada por Mansaneira (2017), que diminuiu a emissão de CO₂ em 24,31%, considerada uma melhora significativa para conter o impacto ambiental gerado através do uso de materiais como o cimento. Enquanto isso, o valor apresentado pelo CCV10 estudado por Matos (2017) foi de somente 3,15% de melhoria, reduzindo brevemente o CO₂ a ser empregado no processo produtivo da argamassa com tal adição e proporção.

Gráfico 2 – Índice e-Energia aos 28 dias



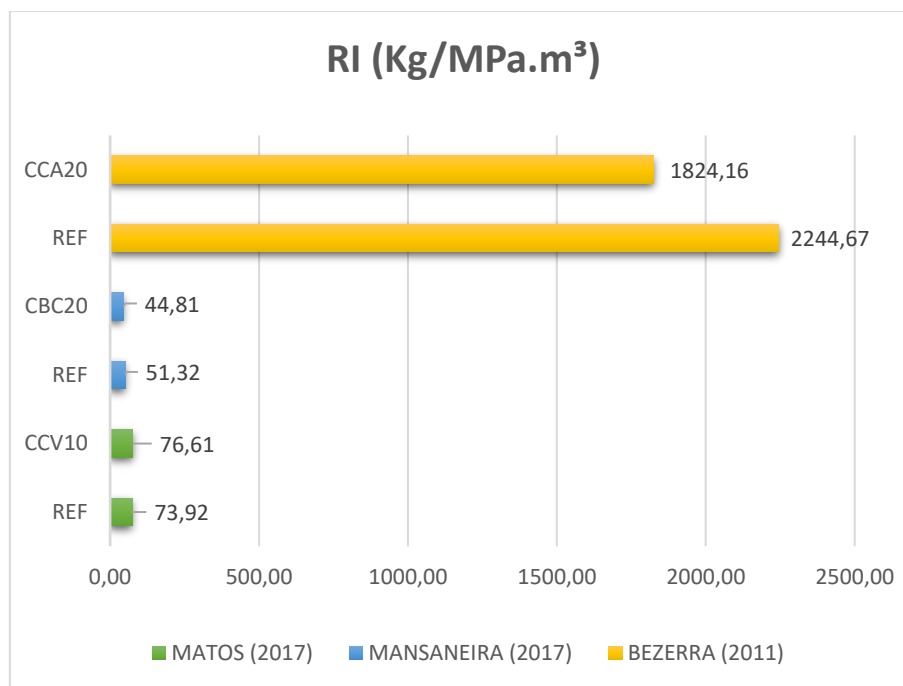
Fonte: Elaborado pelo autor.

Já em relação a energia empregada para a produção da argamassa, de acordo com o Gráfico 2 a melhora identificada foi de 32,41% quando realizada uma comparação entre a argamassa utilizada como referência e a com adição de CCA20, demonstrando também bons resultados e indicando uma redução no consumo de energia que seria necessário para a produção do m³ de argamassa considerando a sua resistência.

Quando são analisados e comparados os índices da energia incorporada, o CCV10 apresenta quase o mesmo valor calculado para a sua respectiva argamassa de referência, reduzindo apenas em 3,04% a energia necessária a ser utilizada. Enquanto isso, a substituição

de cimento Portland por CBC20 demonstra uma melhora de 24,12% em seu desempenho relacionado a diminuição de energia a ser empregada para gerar cada m³ de argamassa utilizando esse resíduo.

Gráfico 3 – Índice e-Recursos aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 3, referente ao índice e-Recursos do CCA20, é apresentada uma melhora mais sutil em relação aos índices e-CO₂ e e-Energia anteriormente apresentados, sendo ela de 18,73% em relação a extração de recursos naturais necessários para que seja produzido o m³ da argamassa.

Analisando o índice e-Recursos acima é possível visualizar um aumento de 3,63% nos recursos utilizados para gerar o m³ de argamassa com adição de CCV10, o que não é o ideal esperado na substituição, pois o que se busca com a adição são melhorias nos índices apresentados de modo que as características da argamassa não sejam prejudicadas. Em contrapartida tem-se o CBC20 apresentando uma redução de 12,68% nos recursos que são extraídos para a argamassa em questão.

Desse modo, os resíduos agrícolas que tiveram seu desempenho ambiental avaliado foram o CCV, CCA e CBC, sendo que o melhor desempenho apresentado foi o traço utilizado por Bezerra (2011), utilizando uma substituição de 20% do cimento por CCA.

6 CONCLUSÃO

Após analisar de maneira crítica os resultados apresentados por cada uma das substituições, é possível concluir com as evidências expostas que a probabilidade de substituição em até 20% do cimento Portland pelo resíduo CCA apresenta comportamentos satisfatórios.

Desse modo, de acordo com os resultados apresentados é possível afirmar que entre os resíduos agrícolas aqui estudados como alternativa ao uso do cimento Portland em argamassas, o resíduo que teve maior destaque foi o CCA, na proporção de 20% de substituição na preparação. Apresentando o melhor desempenho para melhorias em relação a emissão de CO₂, energia incorporada e recursos extraídos, o CCA20 é considerado a melhor opção para ser utilizada como substituição parcial do cimento em argamassas.

Além do desempenho apresentado em relação sustentabilidade desse tipo de argamassa, também é possível destacar o desempenho obtido em relação a compressão aos 28 dias que teve uma melhora de 20% em relação a argamassa de referência.

Apesar de não possuir os melhores resultados referentes ao comportamento, a substituição utilizada do cimento por 20% de CBC também teve resultados consideráveis, não ficando muito atrás dos resultados obtidos com o CCA20, sendo também capaz de apresentar melhora de 7,79% na resistência a compressão aos 28 dias, sendo considerado um resíduo promissor para futuros estudos com o intuito de definir o melhor traço com essa adição em argamassas.

Desse modo, a substituição a apresentar os piores resultados foi a executada com o CCV a 10%, apresentando pouca melhora nos índices e-CO₂ e e-Energia, demonstrando piora no índice e-Recursos de 3,63%. O CCV10 também apresentou menor resistência a compressão que a sua respectiva argamassa de referência, de modo que adições com maiores teores de CCV exercem influência na trabalhabilidade apresentada, resistência mecânica e durabilidade da argamassa.

Portanto, é possível afirmar que o resíduo mais adequado para substituir o cimento Portland de maneira segura e visando o melhor desempenho ambiental é o CCA, sendo utilizado em 20%, que foi a proporção estudada que obteve as melhores características apresentadas quando inserida na produção da argamassa e os melhores resultados referentes a melhorias em relação à diminuição de índices de impacto ambiental. A partir do uso desse resíduo foi então demonstrado que é possível desenvolver uma argamassa com a quantidade a ser utilizada de cimento reduzida em teor de até 20%, oferecendo resultados considerados satisfatórios em

comparação à argamassa de referência utilizada, contribuindo assim com a garantia da sustentabilidade minimizando o uso de energia empregada a partir de sua produção, possibilitando a redução de consumo de cimento Portland nas argamassas sem que suas características sejam comprometidas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, I. M. T. *et al.* **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n. 6, p. 639-645, Campina Grande, mar. 2011.

BUI, D. D.; HU, J.; STROEVEN, P. **Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 3, p. 357-366, 2005.

BRIZOLA, J.; FANTIN, N. **Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura**. Revista de Educação do Vale do Arinos, v. 3, n. 2, p. 23-39, jul./dez. 2016.

CAMPOS, C. A. **Estudo da carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com o emprego de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar**. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, fev. 2018.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. 2011, Anais. Porto Alegre, RS: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2205710/mod_resource/content/1/Roteiro%20para%20revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sistem%C3%A1tica.pdf>. Acesso em: 17 de maio de 2022.

CARRASCO-MALDONADO, F. *et al.* **Oxy-fuel combustion technology for cement production–State of the art research and technology development**. International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 45, p. 189-199, 2016. ISSN 1750-5836.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, out./dez. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/tCFGMV56HZxCDj8dLF6yrFN/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 17 de junho de 2022.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**. Cement and Concrete Composites, v.30, p.410-418, 2008.

COUTINHO, J. S. **Betões eco-eficientes com resíduos**. Jornadas de materiais na construção, p. 171-214, 2011. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Joana_Sousa_Coutinho.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como fonte alternativa de sílica**. Cerâmica Industrial, v. 10, n. 2, mar./abr. de 2005. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657227f8c9d6e028b46cb/pdf/ci-10-2-587657227f8c9d6e028b46cb.pdf>>. Acesso em: 22 de junho de 2022.

DE PAULA, M. O. *et al.* **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 353-357, Campina Grande, 2009.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013. Disponível em: < <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15272> >. Acesso em: 20 de junho de 2022.

ROBERTO, F. A. C. **Cimento**. Balanço Mineral Brasileiro, 2001. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-cimento#:~:text=A%20palavra%20CIMENTO%20%C3%A9%20originada,uma%20mistura%20de%20gesso%20calcinado>>. Acesso em: 18 de junho de 2022.

FARIA, D. G. **Captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono na indústria de cimento**. 2018, 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em:< <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/32406>>. Acesso em: 17 de junho de 2022.

GASQUES, A. C. F. *et al.* **Impactos ambientais dos materiais da construção civil: Breve revisão teórica**. Revista tecnológica, Maringá, v. 23, p. 13-24, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/23375>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção vegetal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 24 de novembro de 2022.

LONG, G.; GAO, Y.; XIE, Y. **Designing more sustainable and greener self-sompeacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 84, p. 301-306, 2015.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEID, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em debate, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan./jun. 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/12110>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

MANSANEIRA, E. C. *et al.* **Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material**. Dyna. Medellín, v. 84, n. 201, p. 163-171, jun. 2017.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. **Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, p. 251-269, mar. 2017.

OLIVEIRA, M. P. *et al.* **Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland**. 2004, Anais. Pirassununga: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais – Habitações e InfraEstrutura de Interesse Social – Brasil NOCMAT, 2004.

OLIVEIRA, M. **Concreto verde: Resíduos agrícolas podem diminuir o uso de cimento e reduzir a emissão de dióxido de carbono**. Revista Pesquisa FAPESP. São Paulo, ed. 146, p. 36-37, abr. 2008. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/concreto-verde/>>. Acesso em: 2 de junho de 2022

POTENZA, R. F. *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil, 1970-2020**. SEEG, 2021.

RIGOLON, F. J. Z.; PICCININI, M. S. **Investimento em infra-estrutura e a retomada do crescimento econômico sustentado**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Social, 1997, 42 p. Disponível em:<<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9654>>. Acesso em: 17 de junho de 2022.

SOUZA, M. M. **Principais patologias estruturais e atuais metodologias de controle na construção civil**. Inter-american Journal of Development and Research, v. 2, n. 1, p. 57-73, jan./jun. 2019.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012. Disponível em:<<https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt->

BR&as_sdt=0%2C5&q=res%C3%ADduos+agricolas&oq=r#d=gs_qabs&t=1669472830147
&u=%23p%3D04x2cJnV_hgJ>. Acesso em: 25 de novembro de 2022.

WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN. **The State of Greenhouse Gases in the atmosphere based on global observations through 2016**. World Meteorological Organization, n. 3, 2017.

ANEXO A

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DOS RESÍDUOS ATRAVÉS DO MODELO PREDITIVO															
Autor	Ano		Substituição (%)	CI 28 dias	CI 63 dias	CI 91 dias	EI 28 dias	EI 63 dias	EI 91 dias	RI 28 dias	RI 63 dias	RI 91 dias	% de melhora CI	% de melhora EI	% de melhora RI
Bezerra	2011	REF	0	135,59	100,03	97,63	805,30	594,07	579,82	2244,67	1655,90	1616,16	-	-	-
		CCA	15	109,48	69,34	80,28	654,83	483,18	476,82	2086,97	1346,80	1329,08	-19,26%	-18,69%	-7,03%
		CCA	20	90,73	72,59	81,35	544,32	536,87	483,18	1824,16	1496,45	1346,80	-33,08%	-32,41%	-18,73%
		CCA	30	87,73	61,41	84,16	530,01	517,69	499,84	1984,74	1443,00	1393,24	-35,30%	-34,19%	-11,58%
Matos	2017	REF	0	13,02	-	-	74,95	-	-	73,92	-	-	-	-	-
		CCV	5	12,93	-	-	74,45	-	-	75,82	-	-	-0,73%	-0,68%	2,56%
		CCV	10	12,61	-	-	72,68	-	-	76,61	-	-	-3,15%	-3,04%	3,63%
		CCV	15	15,93	-	-	82,23	-	-	89,95	-	-	22,33%	9,71%	21,68%
Mansaneira	2017	CBC	REF	9,42	-	-	54,18	-	-	51,32	-	-	-	-	-
		CBC	10	9,54	-	-	54,96	-	-	55,54	-	-	1,32%	1,43%	8,24%
		CBC	20	7,13	-	-	41,11	-	-	44,81	-	-	-24,31%	-24,12%	-12,68%
		CBC	30	7,21	-	-	41,67	-	-	49,65	-	-	-23,41%	-23,09%	-3,25%