

**INSTITUTO FEDERAL**  
Santa Catarina

Ministério da Educação  
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica  
**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA**

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CLAUSIANE SCHABARUM

CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO  
PORTLAND POR CINZA DE BIOMASSA

São Carlos  
Outubro de 2022

CLAUSIANE SCHABARUM

CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO  
PORTLAND POR CINZA DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de  
Curso (TCC) apresentado  
ao Curso de Engenharia  
Civil do Campus de São  
Carlos do Instituto Federal  
de Santa Catarina para a  
obtenção do diploma de  
Graduação em Engenharia  
Civil

Orientadora: Débora Fátima  
Alberici

São Carlos  
Outubro de 2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

Schabarum, Clausiane

Concreto produzido com substituição parcial do cimento portland por cinza de biomassa / Clausiane Schabarum; orientadora Débora Fátima Alberici. – São Carlos, SC, 2022.

33 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Graduação em Engenharia Civil, São Carlos, SC, 2022.

Inclui bibliografias.


1. Engenharia civil. 2. Adição mineral. 3. Cinza de biomassa. 4. Atividade pozolânica. 5. Ecoeficiência. I. Alberici, Débora Fátima. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Título.

CLAUSIANE SCHABARUM

CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO  
PORTLAND POR CINZA DE BIOMASSA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Graduação em Engenharia Civil, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São Carlos, 25 de outubro de 2022.

Documento assinado digitalmente  
 DEBORA FATIMA ALBERICI  
Data: 14/11/2022 14:47:14-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Débora Fátima Alberici, Me.


Orientadora

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Allan Guimaraes Borçato, Esp.

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente  
 ISRAEL DA SILVA MOTA  
Data: 14/11/2022 15:17:22-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Israel da Silva Mota, Esp.

Instituto Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha Estrela Guia e ao mundo que gira.

## RESUMO

Esta pesquisa buscou desenvolver um concreto convencional com substituição parcial do Cimento Portland CP-V ARI por cinza de biomassa. Como problema da pesquisa teve-se: Como desenvolver um concreto convencional ecoeficiente e que emite menos CO<sub>2</sub> na atmosfera, utilizando cinza de biomassa? Justifica-se por reduzir o consumo de cimento Portland (CP) na produção do concreto, reduzindo assim a extração e consumo de recursos naturais e diminuindo os impactos ambientais gerados. A redução no consumo de CP, também reduz a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, principal poluente emitido na produção do clínquer, componente fundamental do CP, sendo assim, considerado um concreto ecoeficiente. O objetivo geral do trabalho é desenvolver um concreto substituindo parte do cimento por cinza de biomassa, a qual é um resíduo industrial. Foram realizados 04 traços com substituição parcial do CP por cinza de biomassa, nas porcentagens de 0%, 5%, 10% e 15%. Além disso, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados. Foram realizados ensaios de compressão axial, a fim de avaliar a influência da incorporação da cinza de biomassa no concreto pesquisado. Por fim, foi realizada uma análise da ecoeficiência dos traços produzidos, por meio de dados de emissões de CO<sub>2</sub> obtidos na literatura. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com redução de consumo de cimento e redução da emissão de CO<sub>2</sub> com a substituição parcial do cimento pela Cinza de Biomassa, tendo o traço CB15 como o mais ecoeficiente, com ótima resistência, mais baixo consumo de cimento e menor emissão de CO<sub>2</sub>.

Palavras-Chave: Adição Mineral. Cinza de Biomassa. Atividade Pozolânica. Ecoeficiência.

## **ABSTRACT**

This research aimed to develop a conventional concrete with partial replacement of Portland Cement CP-V ARI by biomass ash. The research problem was: How to develop a conventional concrete that emits less CO<sub>2</sub> in the atmosphere, using biomass ash? It is justified by reducing the consumption of Portland cement (CP) in concrete production, thus reducing the extraction and consumption of natural resources and reducing the environmental impacts generated. The reduction in CP consumption also reduces the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere, the main pollutant emitted in the production of clinker, a fundamental component of the, thus being considered an ecoefficient concrete. The overall objective of the work is to develop a concrete replacing part of the cement with biomass ash, which is an industrial waste. Forty-four traits were performed with partial replacement of CP by biomass ash, in the percentages of 0%, 5%, 10% and 15%. In addition, the materials used were characterized. Axial compression tests were performed in order to evaluate the influence of the incorporation of biomass ash in the concrete researched. Finally, an analysis of the ecoefficiency of the traits produced was performed using CO<sub>2</sub> emission data obtained in the literature. The results obtained were satisfactory, with reduction of cement consumption and reduction of CO<sub>2</sub> emission with partial replacement of cement by Biomass Ash, with the CB15 trace as the most efficient, with excellent resistance, lowest cement consumption and lower CO<sub>2</sub> emission.

Keywords: Mineral addition. Biomass ash. Pozolanic activity. Eco-efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cinza de Combustão de Biomassa: a) ampliação 100 vezes;  
b) ampliação 1000 vezes; c) ampliação 3000 vezes

Figura 2 - Curva granulométrica da areia natural.

Figura 3 - Curva granulométrica da brita zero

Figura 4 - Peneiramento da Cinza de Biomassa

Figura 5 - Ensaio de Tronco cone

Figura 6 - Ensaio de Compressão

Figura 7 - Resistência à Compressão dos CPs

Figura 8 - Consumo de cimento por m<sup>3</sup>

Figura 9 - Consumo de cimento por m<sup>3</sup> por MPa de resistência

Figura 10 - Quantidade de KgCO<sub>2</sub> para produzir um m<sup>3</sup> de concreto

Figura 11 - Ecoeficiência dos traços em relação à emissão CO<sub>2</sub> de por MPa, em cada idade

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Autores e porcentagens utilizadas

Tabela 2 – Porcentagens de Cimento Portland e de Cinza de Biomassa em cada traço

Tabela 3 – Traços dos concretos por metro cúbico

Tabela 4 – Cálculo da emissão de  $\text{KgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  de cada traço na idade de 7 dias

Tabela 5 – Cálculo da emissão de  $\text{KgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  de cada traço na idade de 28 dias

Tabela 6 – Cálculo da emissão de  $\text{KgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  de cada traço na idade de 90 dias

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>2</b>
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Emissão de gases na produção do Cimento Portland</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Concreto com Incorporação de Adições Minerais</b>	<b>7</b>
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Revisão Bibliográfica</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Dosagem do Concreto</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Cimento Portland</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Cinza de Biomassa Natural</b>	<b>15</b>
<b>3.5 Agregados</b>	<b>16</b>
<b>3.6 Ensaio Realizados</b>	<b>16</b>
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Dosagem do Concreto</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Materiais</b>	<b>18</b>
<b>4.3 Ensaio Realizados</b>	<b>20</b>
<b>4.4 Resistência à Compressão</b>	<b>21</b>
<b>4.5 Ecoeficiência do Concreto</b>	<b>22</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento é um dos materiais mais utilizados na construção civil, porém tem também um processo bastante poluente com extração de diversos recursos naturais. Dentre seus componentes estão: calcário, argila, minério de ferro e gesso, além da adição de diversos materiais como escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e carbonáticos, sendo responsável por grande emissão de gases, sendo o principal o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) (MARCELLO, 2018).

O processo produtivo do cimento gera significativos impactos ambientais e sociais, desde o processo de extração da matéria prima, explorando recursos naturais finitos, até o processamento destas matérias primas para a produção do cimento. Com destaque à produção do clínquer, que é obtido a partir da queima de matérias-primas moídas em um forno rotativo a temperaturas de até 1450 °C e posterior resfriamento, possuindo elevado potencial poluidor devido à elevada emissão de CO<sub>2</sub> para o meio ambiente (CARVALHO, 2008).

Os impactos sociais destacados, estão relacionados à extração da matéria prima em algumas plantas de extração, causando conflitos com comunidades próximas, devido a alterações nos habitats próximos às fábricas, com a emissão de material particulado, causando muitos problemas à saúde humana, além de emitir gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CARVALHO, 2008).

Assim, a cinza de biomassa natural é um resíduo muito comum, gerado a partir da combustão da biomassa que em seu processo de queima gera um produto primário que é a energia e/ou calor e como produto secundário produz as cinzas. Ricas em compostos de base cálcio, silicosos ou sílico-aluminosos, sendo que, desse modo, as cinzas têm grande atuação como materiais pozolânicos, muito eficientes na utilização em concretos, com diversos estudos já realizados com sua utilização na construção civil (NASCIMENTO; *et al*, 2019).

Assim, o presente trabalho justifica-se por desenvolver um concreto com substituição de parte do Cimento Portland por Cinza de Biomassa, mantendo a resistência do concreto, porém reduzindo os impactos ambientais por reduzir a retirada de recursos naturais e redução de emissão de gases, utilizando resíduos (Cinza de Biomassa) que iriam poluir o meio ambiente. Podendo gerar ainda um concreto mais ecoeficiente e também econômico, pois com a extração de recursos naturais finitos há subseqüentes aumentos de preço do cimento. Dessa forma, a

adição da Cinza de Biomassa se justifica por razões tecnológicas, econômicas, ecológicas e de sustentabilidade (GUEDERT, 1989).

Além disso, o trabalho ainda proporcionou um destino adequado e útil à Cinza de Biomassa, que em muitas indústrias se torna um resíduo de difícil e onerosa destinação, passível de multas em caso de discordância com normativas de destinação de resíduos, gerando impasses à indústria, além de dispêndio de pessoal, tempo e recursos financeiros.

Desse modo, o trabalho teve como tema: Concreto produzido com substituição parcial do Cimento Portland por Cinza de Biomassa. Visando o desenvolvimento de um concreto com a substituição parcial do cimento, a fim de manter a resistência, porém reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de cimento e os impactos ambientais gerados. Já o problema do trabalho foi: Como desenvolver um concreto ecoeficiente e que emite menos CO<sub>2</sub> na atmosfera, utilizando Cinza de Biomassa? No caso deste trabalho, utilizou-se Cinza de Biomassa, resíduo oriundo de indústria de celulose.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um concreto convencional com substituição parcial do Cimento Portland por cinza de biomassa.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais utilizados na produção dos concretos;
- Avaliar a resistência à compressão axial dos traços produzidos;
- Avaliar a ecoeficiência dos traços pesquisados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Emissão de gases na produção do Cimento Portland

Em 2018, a produção de cimento chinesa aumentou 3% ao ano e, como o método de produção do cimento é baseado na extração e consumo de recursos naturais, com alto consumo de energia, acaba gerando altas emissões de CO<sub>2</sub>, representando entre 5% e 7% das emissões antropogênicas globais de CO<sub>2</sub> (REN *et al.*, 2020).

Há um crescimento mundial da construção civil e, conseqüentemente, da produção do concreto. Em 2019, a China atingiu o pico de consumo de concreto com cerca de 2,55 bilhões de metros cúbicos e uma produção de 2,33 bilhões de toneladas, o que representa significativo uso de recursos não renováveis, surtindo efeitos negativos no desenvolvimento sustentável e ao meio ambiente (CAO *et al.*, 2022).

Além disso, o concreto é um dos materiais mais importantes para a construção civil mundial, sendo um material composto de 4 componentes básicos: cimento, areia, brita e água. No Brasil, a maior parte das obras é feita em concreto. Porém, o cimento, um dos componentes principais do concreto, é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>. Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatham House (2018), se sua indústria fosse um país, seria o terceiro maior emissor desse gás no mundo, atrás apenas da China e dos Estados Unidos.

Assim, o cimento torna-se fundamental para a realização de qualquer obra de construção civil, seja ela de grande ou pequeno porte, ficando evidente o motivo do cimento ser o material produzido e mais consumido pelo homem no mundo. No entanto, a sua produção também apresenta grande relevância quanto às emissões de CO<sub>2</sub>, principalmente no processo de produção do clínquer, sendo responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> emitidas pelo homem (SNIC, 2019).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, sendo composto de agregados graúdos e finos, cimento e água, porém com grande dispêndio de energia para sua produção e emissão de gases poluentes, como o CO<sub>2</sub>. Assim deve-se pensar em minimizar esses dispêndios além de reduzir o consumo de cimento no concreto (NAGROCKIENÈ; DAUGÈLA, 2018).

Desse modo, o cimento é muito utilizado na construção civil, sendo uma mistura de compostos químicos de origem de rochas, tendo como principais componentes: calcário, argila, minério de ferro e gesso, além da adição de diversos materiais como escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e carbonáticos (MARCELLO, 2018).

De acordo com Carvalho (2008), o processo produtivo do cimento gera significativos impactos ambientais e sociais, desde o processo de extração da matéria prima e a exploração dos recursos naturais finitos, até o processamento destas matérias primas para a produção do cimento.

A produção do clínquer, que é obtido a partir da queima de matérias-primas moídas em um forno rotativo a temperaturas de até 1450 °C e posterior resfriamento, possui elevado potencial poluidor devido à elevada emissão de CO<sub>2</sub> para o meio ambiente. Ainda são gerados conflitos nas comunidades e arredores onde são extraídos estes recursos naturais, pois são emitidos diversos materiais particulados que são responsáveis por causar problemas de saúde, principalmente respiratórios, à população neste ambiente (CARVALHO, 2008).

Desse modo, a utilização de adições minerais é uma das formas de redução do consumo de clínquer do cimento e geração de benefícios ecológicos. Visto que vários tipos de adições minerais são resíduos ou rejeitos em um processo industrial, os quais precisam de uma destinação adequada, ou seja, a sua correta destinação final gera um custo para a indústria em que ela é produzida (MEHTA; MALHOTRA, 1996). Assim como a utilização de cinza de biomassa proposta por este trabalho.

A biomassa é uma fonte renovável, sendo a cinza um resíduo proveniente da combustão da biomassa e, acaba se tornando um problema ambiental e econômico relevante para as indústrias de combustão. Por isso, têm surgido vários estudos com a adição destes resíduos ao concreto para a obtenção de um concreto mais leve com incorporação de materiais de baixa densidade (ROSALES *et al.*, 2016).

Rosales *et al.* (2016) destacam a possibilidade de aplicação de cinza de biomassa, como forma de reaproveitamento de resíduos e subprodutos industriais que iriam para aterros sanitários e/ou causariam impactos ambientais e, com sua substituição parcial na fabricação de concretos.

As emissões de CO<sub>2</sub> também são drasticamente reduzidas na produção do concreto com o uso de resíduos industriais em comparação com a produção do concreto convencional. A utilização de resíduos industriais, assim como a cinza de

biomassa, tem se tornado uma opção sustentável de produção de concreto, sendo esses produtos denominados "materiais verdes". Possuindo alto desempenho em sua função e sendo um caminho para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> (REN *et al.*, 2020).

Segundo Ren *et al.* (2020), as vantagens destacadas no uso de resíduos industriais na substituição parcial do cimento para a produção do concreto, também tem refletido positivamente na avaliação do ciclo de vida do produto. Porém, destaca que ainda é preciso desmistificar alguns conceitos contrários a respeito da incorporação de resíduos na produção do concreto.

A avaliação do ciclo de vida das construções está cada vez mais em evidência, colocando em destaque a Engenharia Civil, a utilização de recursos naturais e a emissão de CO<sub>2</sub> dos produtos utilizados na fabricação do concreto. Destacando cada vez mais concretos de várias composições, assim como concreto de alto desempenho misturado com cinzas de diversas origens, devido a sua redução na emissão de CO<sub>2</sub> (PARK; TAE; TIM, 2012).

Essa preocupação com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> de muitas indústrias em todo mundo é porque não podemos deixar de lembrar que foi acordado na convenção sobre mudanças climáticas, a redução das emissões de gases de efeito estufa, dentre eles o CO<sub>2</sub>. Implementação esta iniciada com o Protocolo de Kyoto, adotado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas para a redução dos gases de efeito estufa até 2020 (PARK; TAE; TIM, 2012).

Pesquisas vêm sendo realizadas há muitos anos a fim de reduzir a quantidade de cimento utilizado e mitigar a Pegada de Carbono (volume total de gases de efeito estufa (GEE) gerado pelas atividades econômicas e cotidianas do ser humano), já que esses assuntos têm estado cada vez mais em pauta depois dos acordos feitos nas Convenções sobre Mudanças Climáticas (YURT; BEKAR, 2022).

O setor da Construção Civil "...pode ser considerado como uma indústria ecodestrutiva e esforços para transformar em uma indústria ecologicamente correta são necessários para a conservação ambiental" (PARK; TAE; TIM, 2012, p. 2). Pois o seu principal material utilizado emite significativa quantidade de CO<sub>2</sub> em todas as suas etapas. Os autores ainda destacam que em países ambientalmente mais conscientes já se tem diversos projetos de produção de concreto com economia de energia e redução de emissão de CO<sub>2</sub> em andamento.

## 2.2 Concreto com Incorporação de Adições Minerais

Atualmente diversos tipos de resíduos industriais são objeto de pesquisas com o objetivo de incorporação no concreto, tais como: sílica ativa, cinza volante, cinza de biomassa, gesso de dessulfurização, escória de mármore, rejeitos, lama vermelha, pó de alumina secundário dentre outros resíduos industriais (REN, *et al.*, 2020).

Nascimento *et al.* (2019) também destaca a utilização de filer calcário, filler de quartzo, escória de alto forno, cinza volante dentre outros materiais alternativos, proporcionando reduções energéticas, de custo e de emissão de CO<sub>2</sub>.

A cinza de biomassa entra nessa reciclagem com a substituição de parte do cimento na fabricação de concreto. Já há estudos com utilização de 5%, 10% e 15% de cinza e espera-se que estes índices aumentem (NAGROCKIENÈ; DAUGÈLA, 2018).

No caso da cinza de biomassa, Nagrockienè e Daugèla (2018) afirmam que os testes realizados com utilização de cinza de biomassa têm se mostrado promissores, devido à propriedade aglutinante destas no concreto. A utilização da cinza tem melhorado certas características e reduzindo até o custo do concreto. Os autores acima destacam ainda a importância do uso de fontes de energia renováveis com menor impacto ambiental, pois as indústrias madeireiras de celulose, entre outras, que queimam resíduos madeireiros, palha e outros, geram cinzas como resíduos da incineração de biomassa, sendo muitas vezes descartadas em aterros sanitários.

A cinza de biomassa natural é um resíduo muito comum, gerado a partir da combustão de biomassa que em seu processo de queima gera um produto primário que é a energia e/ou calor e como produto secundário produz as cinzas, ricas em compostos de base cálcio, silicosos ou sílico-aluminosos, sendo que, desse modo, podem ter grande atuação como materiais pozolânicos, muito eficientes na utilização em concretos (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

A incineração de biomassa para a produção de energia é muito importante pois reduz o custo da produção de energia, porém nesse processo, grandes quantidades de cinzas são geradas e acabam se tornando resíduos sendo descartadas em aterros sanitários, podendo causar sérios riscos ambientais.

Diversas pesquisas já vêm sendo feitas e mostram que esses resíduos podem ser reciclados e utilizados na construção civil (NAGROCKIENÈ; DAUGÈLA, 2018).

O uso de cinzas reativas como material cimentício pode levar a redução de emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), causados pela produção de cimento. Também melhora as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, pois com o efeito pozolânico da cinza de biomassa também se obtém um aumento da resistência do concreto, e a vantagem ambiental embutida em todo o processo, dando um destino adequado para os resíduos gerados pelas indústrias (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

Além disso, Nagrockienè e Daugèla (2018) também reforçam que a utilização de cinzas na produção de concreto permite reduzir a quantidade de cimento e a emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, caracterizando-se como um concreto ecoeficiente. Dessa forma, a composição química da cinza de biomassa é muito importante para sua utilização no concreto e, essa composição varia de acordo com o cultivo da biomassa, o tipo de solo, os parâmetros de incineração, entre outros, pois determinam a quantidade de carbono e diversos minerais presentes na biomassa, o que acaba influenciando na composição química da cinza gerada.

A cinza de biomassa utilizada neste trabalho é oriunda de indústria de combustão de celulose e, devido à custos de destinação desse resíduo que diversas empresas desse mesmo ramo enfrentam, sendo um resíduo de difícil e onerosa destinação, passível de multas à indústria em caso de discordância com normativas de destinação de resíduos, gerando impasses à indústria, além de dispêndio de pessoal, tempo e recursos financeiros (CELULOSE, 2022).

Dessa forma Cao *et al.* (2022) reafirmam a importância do uso de resíduos sólidos para o desenvolvimento de um concreto mais ecológico, destacando o uso de cinzas oriundas de processos de queima industrial, como substituição de parte do cimento no concreto, pois trata-se de um recurso renovável, seguindo assim um caminho para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil.

Há diferentes tipos de cinzas geradas de acordo com o tipo de material incinerado. A cinza de casca de arroz, uma das mais utilizadas, é um subproduto que pode conter sílica não cristalina, e assim, tem alto potencial para ser adicionado a argamassas e concretos em substituição de parte do cimento. Contudo, como a queima é descontrolada, geralmente o teor de carbono em sua composição é alto, o que prejudica a atividade pozolânica da cinza, sendo ideal que a queima seja

realizada em ambiente controlado para que se obtenha uma cinza com maiores propriedades pozolânicas (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

Os autores acima afirmam ainda que a temperatura ideal de queima controlada em caldeiras deve ser inferior a 900 °C, para que seja produzida uma pozolana branca altamente reativa com sílica não cristalina e baixo teor de carbono, ideal para ser utilizada no concreto. Além disso, o material deve queimar totalmente para que não permaneçam resíduos parcialmente queimados junto à cinza.

A NBR 16697 (ABNT, 2018) define assim materiais pozolânicos, sendo materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade hidráulica, mas que, quando finalmente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, em temperatura ambiente formando compostos com propriedades.

...materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade hidráulica, mas que, quando finalmente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias (ABNT, 2018, p.3).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para se enquadrar como material pozolânico, o material deve reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) proveniente do cimento, formando assim o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. A adição deste material pozolânico em concreto, argamassas e pastas, em relação a uma referência, em iguais condições, via de regra promovem aumento da resistência à compressão e à flexão em idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades, devido à reatividade lenta da pozolana.

Segundo Botelho e Marchetti (2015), aos 28 dias o concreto já possui expressiva resistência, porém, após esta idade, continua o seu processo de cura e continua ganhando mais resistência. A resistência do concreto aos 3 dias de cura é de 40%, aos 7 dias é de 60%, aos 28 dias 80%, aos 90 dias é de 90% e aos 360 dias de cura é de 100%. Contudo, com a adição da cinza de biomassa, pode-se conseguir um aumento da resistência com o avançar da idade de cura do concreto (BOTELHO; MARCHETTI, 2015).

Além disso, a adição de materiais pozolânicos confere ainda muitas vantagens como: redução da porosidade e permeabilidade do concreto, aumento da

resistência a sulfatos, aumento da resistência à difusibilidade de íons cloreto e conseqüentemente a redução da ocorrência de eflorescências (ABNT, 2014).

Ainda de acordo com Nagrockienè e Daugèla (2018), testes realizados por pesquisadores mostraram resultados promissores quanto ao uso de cinza de madeira para substituir parte do cimento no concreto, desse modo, a utilização da cinza de biomassa em concreto modificado deixa de ser uma preocupação ambiental e passa a ser um recurso útil para a produção de um cimento alternativo e eficaz para a utilização na construção civil.

Quanto à resistência de do concreto com adição de cinza, alguns estudos mostram que a quantidade de adição de cinza não deve ultrapassar 20%, pois uma maior quantidade de cinza diminui a resistência à compressão e aumenta a densidade do concreto. As porcentagens de adição mais indicadas são de 5% a 10% para resultados mais satisfatórios de resistência, densidade e absorção de água, sendo os resultados mais positivos observados nas idades após 28 e 90 dias, devido a reação das partículas de cinza nessas idades mais avançadas (NAGROCKIENÈ; DAUGÈLA, 2018).

Assim como Rosales *et al.* (2016) utilizaram as porcentagens de substituição de 0, 15 e 30%, observando grande resistência e durabilidade com 30% de substituição, porém com redução da trabalhabilidade do concreto.

Deste modo, a adição destas cinzas em substituição parcial do cimento no concreto é mais benéfica tanto para os custos de produção como para o meio ambiente, produzindo melhoramentos das propriedades mecânicas e durabilidade em concretos com baixas quantidades de cimento (ROSALES *et al.*, 2016). Este estudo foi produzido para a verificação da porcentagem de substituição mais eficiente de cinza. A Tabela 1 apresenta alguns estudos realizados com cinza de biomassa.

**Tabela 1** – Autores e porcentagens utilizadas.

Autores	Porcentuais de substituição (%)	Ensaio realizados	Idades dos ensaios
Nagroćkienė e Daugėla (2018)	5, 10 e 15%	Compressão e tração.	7, 28 e 90 dias
Cordeiro, Toledo Filho, Fairbairn (2009)	0, 10, 15 e 20%	Compressão, tração, permeabilidade e reologia	7, 28, 90 e 180 dias
Cao <i>et al.</i> (2022)	0, 5, 10, 15, 20 e 30%	Compressão, tração, porosidade, absorção, propriedades físicas e mecânicas	28 dias
Rosales <i>et al.</i> (2016)	0,15 e 30%	Compressão, absorção de água, densidade, porosidade	28 dias

**Fonte:** Autoria própria (2022).

Outro estudo realizado destaca que foram utilizadas porcentagens de substituição de 0, 10, 15 e 20%, sendo que o nível ótimo de substituição de cimento Portland por cinza foi de 20%, obtendo-se maior resistência e durabilidade em relação ao concreto de referência, contudo a trabalhabilidade do concreto ficou bastante reduzida com o aumento da porcentagem de substituição de cinza (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

Segundo Cao *et al* (2022) quanto mais finas as partículas da cinza, maiores são os efeitos pozolânicos e de preenchimento de vazios observados, pois densificam as microestruturas do concreto e melhorando assim a resistência e durabilidade do concreto, além do preenchimento de vazios, o que diminui a entrada de agentes externos que deterioram o concreto. Os autores destacam também a utilização das porcentagens de 5 e 10% de substituição como sendo a mais promissoras em estudos realizados.

Segundo Nagroćkienė e Daugėla (2018), a substituição não deve passar dos 20% devido à redução de trabalhabilidade, de acordo com estudo realizado com as porcentagens de substituição de 5, 10 e 20% de cinza, com a obtenção de melhores resultados de resistência à compressão e densidade nas porcentagens de 5 e 10% nas idades de 28 e 90 dias do concreto, devido à ação pozolânica nas idades mais avançadas.

Em suma, conforme os autores acima citados, a utilização de cinza na substituição do cimento na produção do concreto confere inúmeras vantagens e

melhoramento das propriedades do concreto. Com a produção de um concreto ecoeficiente, com menor consumo de cimento e menor emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo para o meio ambiente e a sustentabilidade.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Revisão Bibliográfica**

Em relação a abordagem a pesquisa se classifica como quali-quantitativa. Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada objetivando gerar conhecimentos para aplicações práticas para solucionar problemas específicos. Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória e descritiva. Quanto aos procedimentos, a pesquisa classifica-se em experimental e bibliográfica.

Será realizada revisão bibliográfica por meio de buscas em artigos, teses e dissertações, publicações em revistas, sites de busca como SciELO, Google Acadêmico, dentre outros, a fim de obter as informações necessárias, além da identificação, em pesquisas já realizadas, de porcentagens ideais para os testes de substituição do cimento por cinza, para obter os melhores resultados do concreto a ser desenvolvido.

### **3.2 Dosagem do Concreto**

A dosagem do concreto foi realizada de acordo com a ABCP (2002) considerando uma resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias de idade. Foram dosados quatro traços com as seguintes porcentagens de substituição do cimento por cinza de biomassa (CB): 0%, 5%, 10% e 15%.

Por meio do estudo bibliográfico foi preestabelecido que o cimento utilizado fosse o CP V-ARI, pelas suas propriedades de pureza, zero adição de escória de alto-forno, zero adição de pozolana e até 5% de filler, considerando a resistência de 32 MPa do cimento aos 28 dias para fins da realização dos cálculos (ABNT, 2018).

A definição das porcentagens de substituição parcial do cimento pela cinza foi realizada com base nas pesquisas abordadas no referencial teórico e conforme apresentado na Tabela 1. Observou-se as porcentagens mais utilizadas de substituição em trabalhos publicados além da finalidade de observação de dados de cada estudo.

Nos estudos, nos quais baseou-se a adoção das porcentagem de substituição, ambos os autores apresentaram percentuais de substituição de cinza de biomassa semelhantes, com observação de obtenção de resultados positivos

quanto aos dados por estes avaliados, servindo de base para a definição de substituição para o presente trabalho.

As relações de substituição de Cimento Portland por cinza de biomassa (em percentual) para a produção dos traços do concreto, que foram calculados pelo método da ABCP, estão relacionadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Porcentagens de Cimento Portland e de Cinza de biomassa em cada traço.

Traço	Cimento (%)	Cinza de biomassa (%)
CB00	100	0
CB05	95	5
CB10	90	10
CB15	85	15

**Fonte:** Autoria própria (2022).

Com os autores pesquisados definiu-se as idades de realização dos testes de resistência à compressão do concreto desenvolvido. Adotou-se as idades de 7, 28 e 90 dias, de acordo com os resultados da pesquisa bibliográfica, para a obtenção de resultados palpáveis quanto a resistência e durabilidade do concreto e a observação da possibilidade da atividade pozolânica da cinza de biomassa utilizada, com a obtenção de maior resistência em idades mais avançadas.

Foi acrescentado 0,2% de aditivo Superplastificante (SP) no traço CB10 e 0,5% no traço CB15. Isso devido à trabalhabilidade do concreto que, conforme Nagrockienè e Daugèla (2018), acaba reduzindo a trabalhabilidade com o aumento da porcentagem de substituição de cinza. Por se tratar de finos, necessitam de maior quantidade de água, porém como a quantidade de água, areia e brita zero foi mantida constante, de modo a não influenciar nos resultados. Fez-se necessário essa adição de superplastificante para alcançar a trabalhabilidade e abatimento de tronco cone, o qual foi estabelecido em  $10 \pm 2$  cm.

### 3.3 Cimento Portland

O cimento utilizado no estudo foi o Cimento Portland CP V-ARI que é um cimento de alta resistência precoce, atingindo cerca de 84% da sua resistência na

idade de 7 dias, apresentando alta resistência desde as primeiras idades, atingindo a resistência máxima até a idade de 28 dias. Comportamento este que está de acordo com as características físico-químicas deste tipo de cimento, quanto à constituição de clínquer, calcário e quantidade de adição mineral e fineza (HOPPE FILHO *et al.*, 2021).

O que diferencia o cimento Portland CP V-ARI dos demais cimentos, além das características acima citadas, é a utilização diferenciada de dosagem de calcário e argila na produção do clínquer. O clínquer é o mesmo utilizado em concretos convencionais, porém com maior tempo de moagem, obtendo-se partículas mais finas, de modo que, ao reagir com a água, adquire elevada resistência com maior velocidade, comparado aos demais cimentos, nas primeiras idades do concreto (CP V-ARI, 2022).

Esse tipo de cimento é indicado para a produção industrial de artefatos que exijam rápida desforma, blocos de concreto, pisos industriais, concretos de alto desempenho (CAD) e concretos protendidos pré e pós-tensionados (CP V-ARI, 2022).

De acordo com as características apresentadas acima, ressalta-se a importância da escolha correta do tipo de cimento utilizado para este estudo. O Cimento Portland CP V-ARI foi escolhido pelo rápido endurecimento e alta resistência inicial, sob as normas brasileiras. Possui características comparáveis ao cimento comum. Apresenta ainda baixo teor de substituição de clínquer por material carbonato, alto teor de sílicas hidratadas de cálcio, além de maior fineza das partículas. Essas propriedades permitem a avaliação de um resíduo pozolânico, cimentado ou não reativo, não sofrendo interferência dos materiais constituintes do cimento utilizado para a análise (SANTOS; GONÇALVES; ANDRADE, 2020).

### **3.4 Cinza de Biomassa Natural**

A cinza utilizada neste estudo foi a cinza de biomassa oriunda de indústria de celulose. Esta cinza é resultante de um processo de lavagem e filtração da cinza em suspensão na indústria, que tem como um dos resultados do processo a produção de uma cinza bem fina, que devido a sua finura é bem mais propícia a sua utilização na produção do concreto, sendo que dessa forma a cinza utilizada passou pelo processo de peneiramento (PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS, 2022).

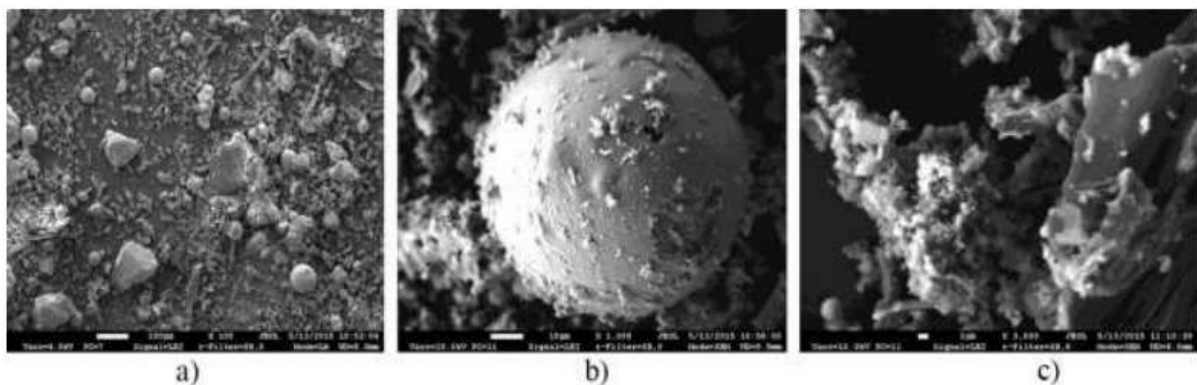
Embora a cinza de biomassa utilizada já fosse oriunda de um processo de filtração com obtenção de partículas mais finas, observou-se que a cinza ainda continha partículas irregulares e material não totalmente queimado.

Dessa forma, a cinza de biomassa utilizada neste estudo, foi peneirada com auxílio de equipamento vibratório, sendo utilizada apenas a cinza passante na peneira 200 micrômetros. O peneiramento foi realizado para que se tivesse um material com maior finura e homogeneidade de partículas finas, evitando a presença de partículas grandes de cinza.

A utilização destes resíduos de cinza de biomassa, proporcionam um destino adequado e útil à cinza que, assim como em muitas indústrias se torna um resíduo de difícil e onerosa destinação, passível de multas em caso de discordância com normativas de destinação de resíduos, gerando impaces à indústria, além de dispêndio de pessoal, tempo e recursos financeiros (CELULOSE, 2022).

Segundo Cordeiro, Toledo Filho e Fairbrairn (2009), há diferentes tipos de cinzas geradas durante a combustão, de acordo com o tipo de material incinerado. A cinza aqui utilizada é a cinza obtida em suspensão no recinto de coleta, não se tratando a cinza de fundo. Desse modo, a cinza utilizada neste estudo é composta por partículas mais finas.

**Figura 1** - Cinza de combustão de Biomassa: a) ampliação 100 vezes; b) ampliação 1000 vezes; c) ampliação 3000 vezes.



Fonte: Nagrockienè e Daugèla (2018).

Na Figura 1 consegue-se observar, segundo os autores Nagrockienè e Daugèla (2018), que mesmo a cinza tendo partículas muito finas, com auxílio de microscópio, consegue-se observar a irregularidade das partículas da cinza.

### **3.5 Agregados**

Foi realizado ensaio de granulometria seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para determinação da granulometria dos agregados.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de classificação média, com partículas com forma ligeiramente arredondadas.

Já o agregado graúdo utilizado foi a brita zero, também chamada de pedrisco, possui tamanhos finos que variam entre 4,8mm a 9,5mm.

### **3.6 Ensaio macroestruturais no concreto**

O concreto foi produzido seguindo rigorosamente o traço calculado. A moldagem dos corpos de prova foi executada conforme especificação da NBR 5738 (ABNT, 2015). A determinação da consistência do concreto foi feita pelo teste de abatimento do tronco cone seguindo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e a cura do concreto seguiu as determinações da NBR 9479 (ABNT, 2006), seguindo-se todos os procedimentos para permitir que se obtenha corpos de prova igualmente produzidos, para resultados mais fidedignos.

Os ensaios de compressão seguiram a NBR 5739 (ABNT, 2018), por meio dos quais se obtém a resistência à compressão do concreto em cada idade estipulada pela norma, sendo de 7, 28 e 90 dias, com 04 (quatro) Corpos de Prova (CP) para cada idade e para cada um dos 04 (quatro) traços desenvolvidos (CB00, CB05, CB10 e CB15%). Foi utilizado corpo de prova com as dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, num total de 48 corpos de prova.

Por último, os dados obtidos foram tabulados e analisados graficamente, observando ainda a NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo realizada ainda a leitura e comparação dos mesmos com índices normativos. Foi realizada a verificação da maior resistência obtida em cada porcentagem de adição de cinza, verificando a ecoeficiência do concreto.

Por fim, foi realizada uma análise por meio do método de análise de variância (ANOVA) e comparação múltipla entre médias dos resultados do ensaio de compressão axial, utilizando um nível de significância de 95%.

Com isso, a pesquisa buscou através da realização de ensaios encontrar uma porcentagem eficiente de substituição, buscando a comprovação da obtenção de

índices positivos, numa substituição adequada, na resistência e ecoeficiência do concreto, seguindo o método de traço especificado pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Dosagem do Concreto

A Tabela 3 apresenta os traços calculados com embasamento no referencial teórico para as porcentagens de substituição do cimento pela cinza e seguindo o método descrito pela ABCP.

**Tabela 3** – Traços dos concretos por metro cúbico.

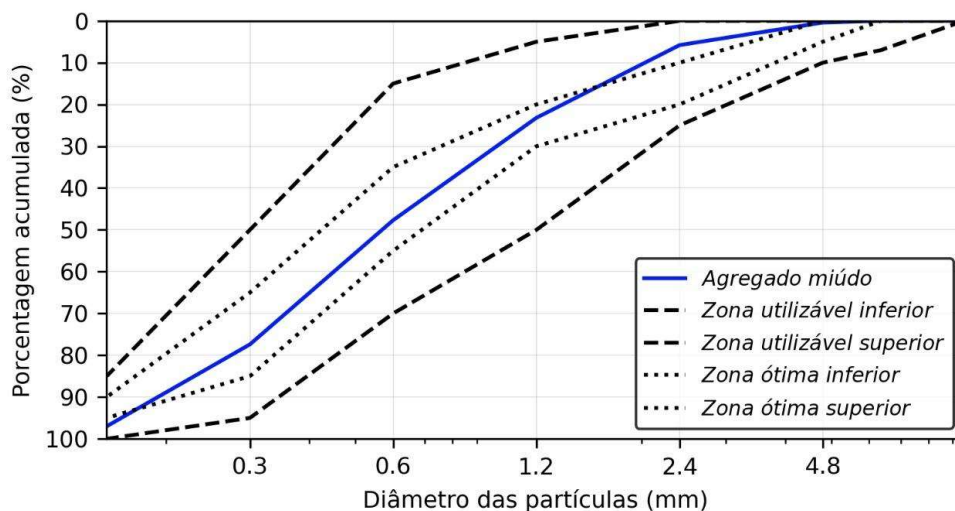
Identificação	Cimento (kg)	Cinza de biomassa (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	SP (kg)	SP* (%)
CB00	442,3	-	865,05	862,50	230	0	0
CB05	420,2	22,1	865,05	862,50	230	0	0
CB10	398,1	44,2	865,05	862,50	230	0,88	0,20
CB15	376,0	66,4	865,05	862,50	230	2,21	0,50

Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.2 Materiais

O ensaio de granulometria da areia média resultou na distribuição das partículas representadas na curva granulométrica da Figura 2, com valores da curva dentro dos parâmetros considerados aceitáveis para a sua utilização neste estudo.

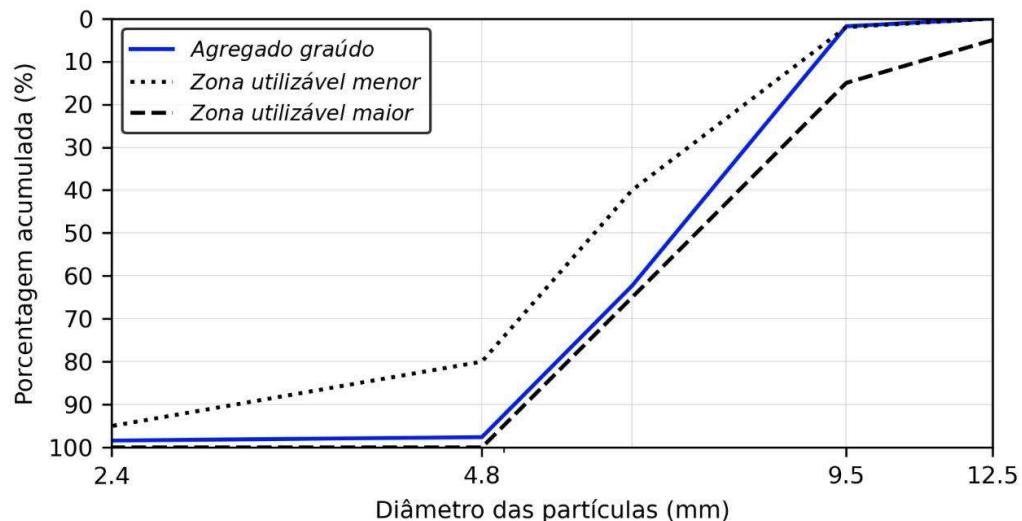
**Figura 2** - Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: Autoria própria (2022).

Já o ensaio de granulometria da brita zero, agregado graúdo utilizado na produção do concreto, resultou na distribuição das partículas da curva apresentada na Figura 3, com os valores da curva dentro dos parâmetros aceitáveis.

**Figura 3** - Curva granulométrica da brita zero.



Fonte: Autoria própria (2022).

A figura 4 mostra os resultados obtidos do processo de peneiramento da cinza de biomassa realizado com o agitador de peneiras, no laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSC), campus de São Carlos, Santa Catarina. Na primeira imagem observa-se a variação dos tamanhos das partículas da cinza de biomassa obtidos com o uso de diferentes diâmetros de peneiras, observando-se a retenção de partículas maiores e não totalmente queimadas na peneira maior (peneira mais à direita na primeira imagem) e com partículas bem finas observadas na segunda imagem, que é o recipiente do fundo, contendo apenas a cinza passante na peneira de 200 (0,074mm), sendo utilizado apenas este material mais fino obtido com o peneiramento, para a produção dos concretos deste estudo.

**Figura 4 - Peneiramento da Cinza de Biomassa.**



**Fonte:** Autoria própria (2022).

### **4.3 Ensaios Realizados**

A Figura 5 mostra resultados obtidos por meio dos ensaios realizados de abatimento do tronco cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), com valores obtidos dentro do estabelecido por este estudo ( $10 \pm 2$  cm) Já a Figura 6 mostra resultados do ensaio de resistência à compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), com bons resultados de rupturas dos corpos de prova cilíndricos, mostrando bons resultados quando o cisalhamento ocorre em planos inclinados em relação à direção da força cortante que a gera, resultando numa linha de fratura que atravessa o corpo de prova na diagonal.

**Figura 5 - Ensaio de abatimento do tronco cone.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 6 - Ensaio de compressão axial do concreto**

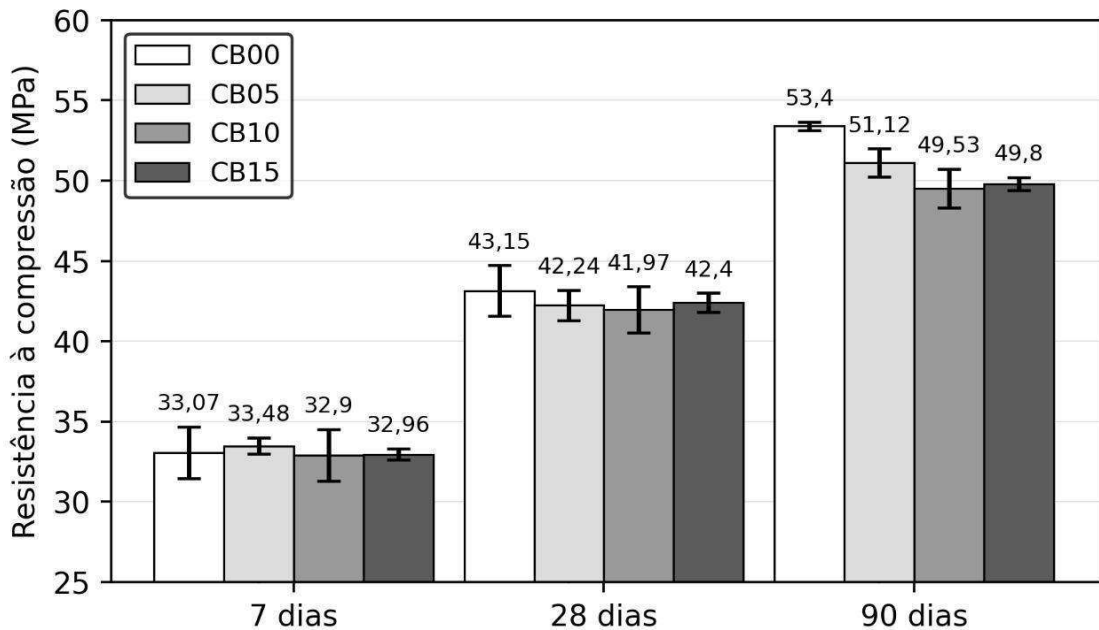


Fonte: Autoria própria (2022).

#### 4.4 Resistência à compressão

Os resultados obtidos com os ensaios de compressão encontram-se no gráfico da Figura 7. Têm-se os resultados dos quatro traços nas idades de 7, 28 e 90 dias.

**Figura 7 - Resistência à Compressão dos CPs.**



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Observou-se um aumento da resistência à compressão em ambos os traços, tanto no de referência (CB00) como nos traços com porcentagens de substituição parcial por cinza nas três idades.

Porém, observa-se pouca variação na resistência entre os traços na comparação dentro da mesma idade. Verifica-se uma diferença da resistência numa comparação do ganho de resistência de cada traço conforme o avanço da idade, sendo que o CB00 obtém maior ganho de resistência aos 90 dias comparados aos traços com adição de cinza nessa mesma idade.

Quando realizada a análise pelo método de análise de variância (ANOVA) e comparação múltipla entre as médias dos resultados do ensaio de compressão axial, utilizando um nível de significância de 95%, observa-se que não há diferença significativa de resistência entre os quatro traços aos 7 dias, nem aos 28 dias. Já na análise aos 90 dias, somente não é observada diferença significativa do traço CB10

para o CB15, nos demais traços existe diferença significativa na análise da resistência.

Porém, como comumente adota-se a idade de 28 dias para efeitos de análises na construção civil, pode-se afirmar que não há diferença e nem perda de resistência nos traços com as porcentagem de substituição parcial do cimento pela cinza de biomassa.

Dessa forma, pode-se afirmar que o melhor traço é o CB15, com resultados satisfatórios quanto ao fator resistência compressiva, constatando-se a manutenção da resistência mesmo com menor consumo de cimento e maior substituição por cinza. Além disso, a resistência de cálculo (30 MPa) foi atingida em todos os traços já na idade de 7 dias.

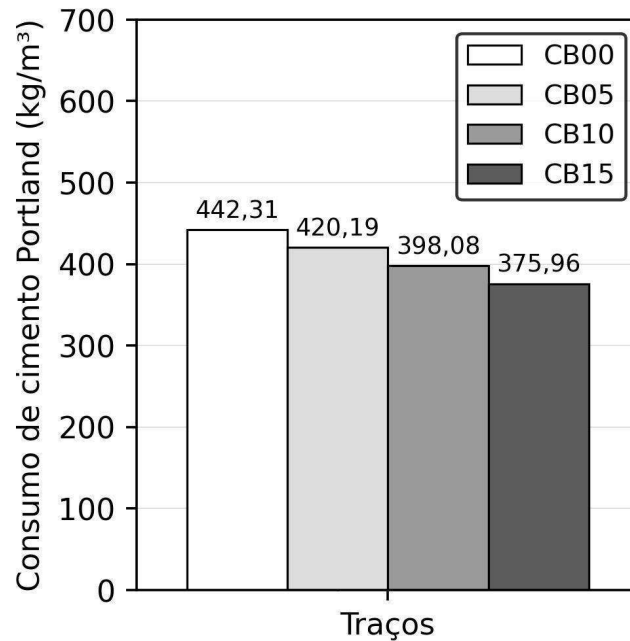
Contudo, de acordo com os resultados obtidos, não se pode confirmar a atividade pozolânica da Cinza de Biomassa utilizada, conforme estudo bibliográfico, pois não se obteve crescimento significativo nas idades mais avançadas dos traços com substituição de Cimento Portland pela Cinza de Biomassa (CB05, CB10 e CB15) em comparação ao traço de referência CB00. Obteve-se inclusive uma resistência um pouco menor no traço CB15, com maior substituição.

Constata-se assim, baixa atividade pozolânica da Cinza de Biomassa estudada, pois conforme estudo bibliográfico, para que a cinza possua características pozolânicas, a combustão deve ser controlada sendo que a temperatura ideal seja inferior a 900 °C para produzir a pozolana branca reativa com sílica não cristalina e baixo teor de carbono, porém deve haver ainda a queima total do material evitando que permaneça resíduo parcialmente queimado junto a Cinza.

#### **4.5 Ecoeficiência do Concreto**

Quanto à ecoeficiência do concreto foram avaliados graficamente os dados referentes ao consumo de cimento por metro cúbico, o consumo de cimento por metro cúbico por MPa de resistência, dados da emissão total de kg.CO<sub>2</sub> por metro cúbico de concreto e ainda a emissão total de CO<sub>2</sub> por MPa em cada idade.

Com relação ao consumo de cimento, tem-se na Figura 8 a quantidade de consumo de cimento por metro cúbico e na Figura 9 o consumo de cimento por metro cúbico por MPa de resistência do concreto.

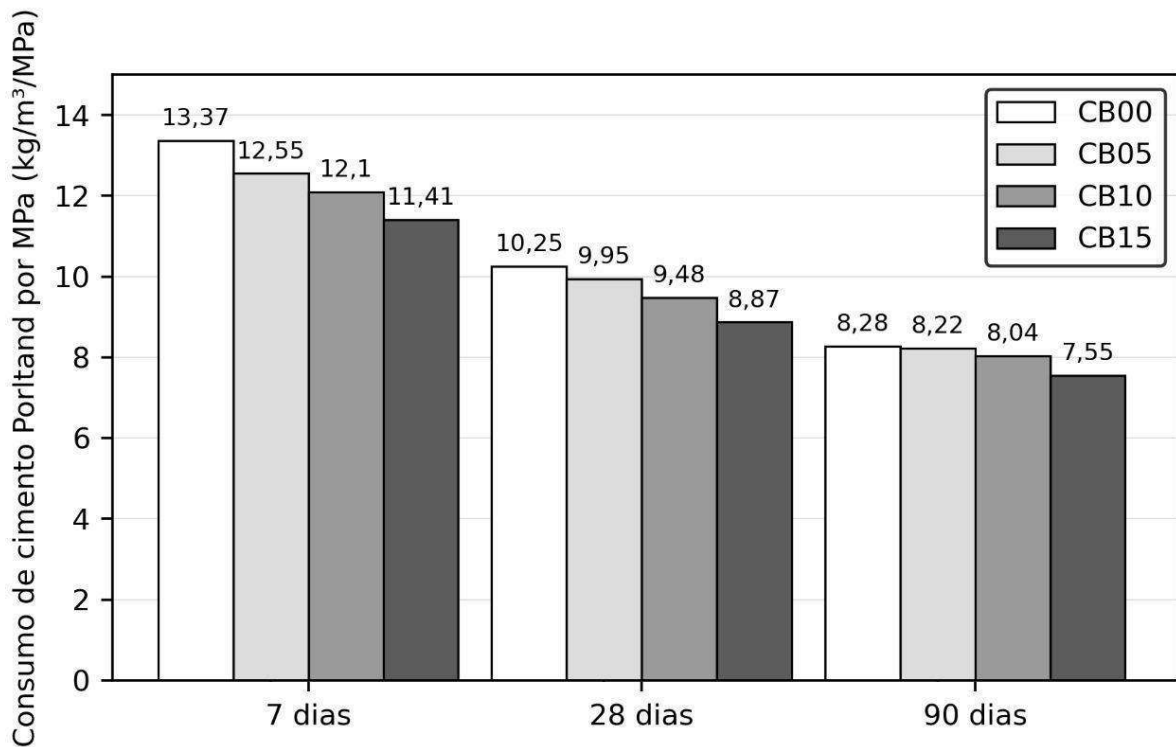
**Figura 8** - Consumo de cimento por m<sup>3</sup>.

**Fonte:** Autoria própria (2022).

No gráfico acima observa-se um decréscimo linear conforme foi aumentado a porcentagem de substituição de cimento Portland por cinza de biomassa. O que justifica um maior consumo de cimento no traço de referência, devido a nenhuma porcentagem de substituição, usando 100% da quantidade de cimento de cálculo do traço, mostrando-se o pior traço nesse quesito. Já o melhor traço foi o CB15, que obteve o menor consumo de cimento por causa da maior porcentagem de substituição, utilizando-se 15% de cinza de biomassa e apenas 85% de cimento.

O mesmo decréscimo linear observa-se no gráfico a seguir, quando levado em consideração o consumo de cimento e a resistência de cada traço.

**Figura 9** - Consumo de cimento por m<sup>3</sup> por MPa de resistência.



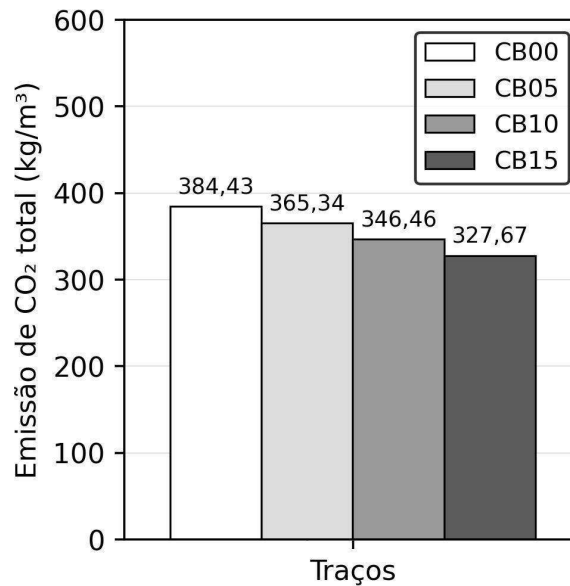
**Fonte:** Autoria própria (2022).

Os resultados do consumo de cimento por m<sup>3</sup> por MPa obtidos, como já esperado, foram excelentes. Segundo Campos *et al.* (2022), os valores de consumo de cimento por MPa do concreto comum na idade curada (28 dias), estão na faixa entre 9 a 14 kg/m<sup>3</sup>/MPa, já o concreto de alto desempenho está na faixa de 5 kg/m<sup>3</sup>/MPa. Os dados obtidos neste estudo mostram (Figura 9), que esses valores são alcançados na idade de 28 dias, sendo que os traços CB00, CB05 e CB10 ficaram dentro da faixa considerada pelos autores, tendo até um valor de consumo de cimento abaixo da faixa no traço CB15, de 8,87 kg/m<sup>3</sup>/MPa.

O traço que apresentou maior consumo de cimento aos 28 dias foi o CB00 aos 7 dias, com um consumo de 10,25 kg/m<sup>3</sup>/Mpa, contudo ainda estando dentro da faixa citada acima (CAMPOS *et al.*, 2022).

Já na idade de 90 dias todos os valores obtidos ficaram abaixo dessa faixa, ficando bem próximo do valor de consumo de cimento por m<sup>3</sup> por MPa do concreto de alto desempenho, que segundo os autores está na faixa de 5 kg/m<sup>3</sup>/MPa, obtendo-se o menor valor de 7,55 kg/m<sup>3</sup>/MPa no CB15.

**Figura 10** - Quantidade de kg.CO<sub>2</sub> para produzir um m<sup>3</sup> de concreto.



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Quanto aos resultados obtidos de emissão total de CO<sub>2</sub> para produzir um metro cúbico de concreto (Figura 10), têm-se o traço CB15 com a menor emissão 327,67 de kg.CO<sub>2</sub>. Esse menor valor de emissão se deve ao menor consumo de cimento que para este traço foi de 375,96 kg, pois houve maior substituição por cinza. Já a maior emissão obteve-se no traço CB00 devido à nenhuma substituição de cimento por cinza, logo com um consumo de 442,31 kg de cimento.

A emissão total de CO<sub>2</sub> obtida foi muito positiva, pois de acordo com Park, Tae e Tim (2012), a tendência a se observar nos resultados da produção do concreto convencional é o aumento linear do nível de resistência, emissão de CO<sub>2</sub> e consumo de cimento, estando estes três parâmetros intimamente relacionados entre si. Porém os resultados observados neste estudo não seguem esta tendência, devido a substituição parcial do cimento em diferentes porcentagens em cada traço, obtendo, mesmo assim, um aumento da resistência e redução de emissão de CO<sub>2</sub>.

Para os cálculos e análise da ecoeficiência dos concretos desenvolvidos com substituição parcial do cimento por cinza de biomassa (Tabela 4, 5 e 6), devem ser adotados alguns fatores de emissão de CO<sub>2</sub> em kg.m<sup>-3</sup>, de acordo com o consumo de cada material kg.m<sup>-3</sup>, os quais de acordo com Campos *et al.* (2022) são: cimento Portland: 0,863 kg.m<sup>-3</sup>; areia: 0,0016 kg.m<sup>-3</sup>; brita zero: 0,00155 kg.m<sup>-3</sup> e superplastificante(SP): 1,133 kg.m<sup>-3</sup>.

Nas tabelas que seguem, foram realizados os cálculos da ecoeficiência em cada traço para as idades de 7, 28 e 90 dias.

Os cálculos realizados para obtenção dos valores de emissão seguiram cálculos realizados por Medeiros *et al.* (2019):  $c_i = (\text{kg de CO}_2 \text{ emitido/m}^3 \text{ de concreto}) / f_c \text{ em MPa aos 28 dias}$ . Com  $c_i$  representando a intensidade de  $\text{CO}_2$ , sendo também feito o cálculo para a idade de 7 dias, obtendo-se os dados apresentados nas tabelas 4, 5 e 6.

**Tabela 4** – Cálculo da emissão de  $\text{kg.CO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  de cada traço na idade de 7 dias.

ID	Cimento Portland ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Cinza de biomassa ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Areia ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Brita 0 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	SP ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	CO2 total ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	CO <sub>2</sub> por MPa aos 7 dias ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ )
CB00	381,71	0	1,38	1,34	0	384,43	11,62
CB05	362,62	0	1,38	1,34	0	365,34	10,91
CB10	343,54	0	1,38	1,34	0,2	346,46	10,53
CB15	324,45	0	1,38	1,34	0,5	327,67	9,94

**Fonte:** Autoria própria (2022).

**Tabela 5** – Cálculo da emissão de  $\text{kgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  de cada traço na idade de 28 dias.

ID	Cimento Portland ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Cinza de biomassa ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Areia ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Brita 0 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	SP ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	CO2 total ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	CO <sub>2</sub> por MPa aos 28 dias ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ )
CB00	381,71	0	1,38	1,34	0	384,43	8,91
CB05	362,62	0	1,38	1,34	0	365,34	8,65
CB10	343,54	0	1,38	1,34	0,2	346,46	8,26
CB15	324,45	0	1,38	1,34	0,5	327,67	7,73

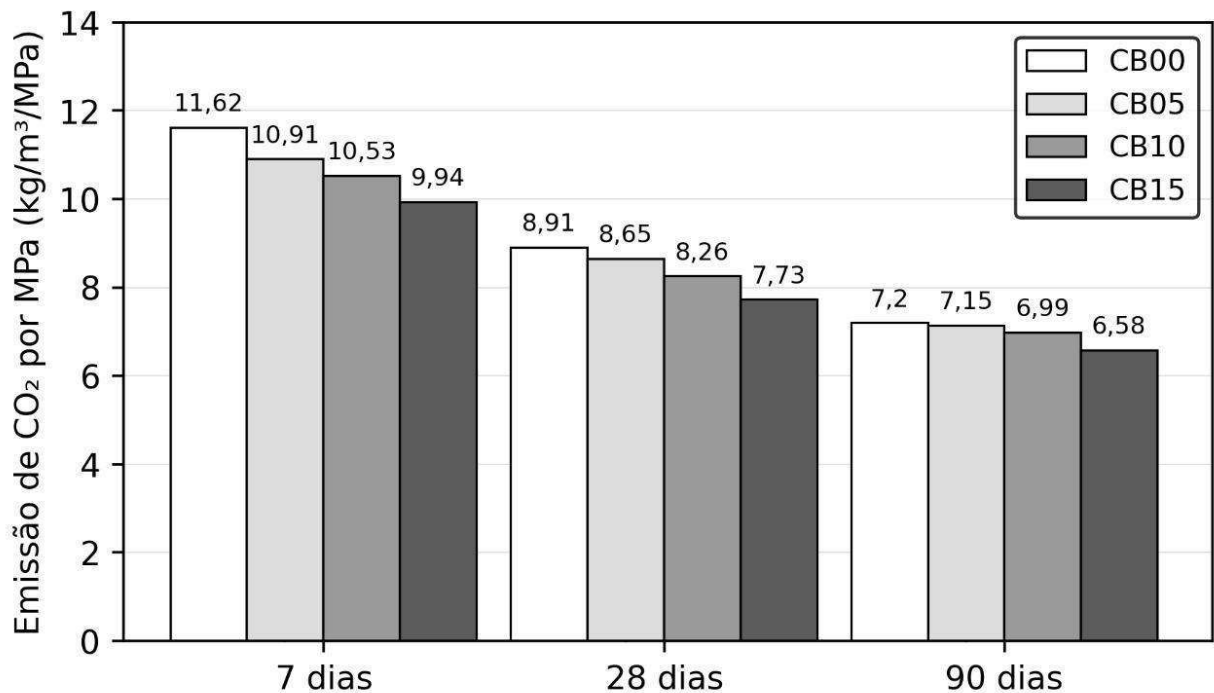
**Fonte:** Autoria própria (2022).

**Tabela 6** – Cálculo da emissão de kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa de cada traço na idade de 90 dias.

ID	Cimento Portland (kg.m <sup>-3</sup> )	Cinza de biomassa (kg.m <sup>-3</sup> )	Areia (kg.m <sup>-3</sup> )	Brita 0 (kg.m <sup>-3</sup> )	SP (kg.m <sup>-3</sup> )	CO <sub>2</sub> total (kg.m <sup>-3</sup> )	CO <sub>2</sub> por MPa aos 90 dias (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )
CB00	381,71	0	1,38	1,34	0	384,43	7,20
CB05	362,62	0	1,38	1,34	0	365,34	7,15
CB10	343,54	0	1,38	1,34	0,2	346,46	6,99
CB15	324,45	0	1,38	1,34	0,5	327,67	6,58

Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores obtidos nas tabela acima resultaram no gráfico da Figura 11, que apresenta a ecoeficiência de cada traço nas três idades avaliadas, apresentando as emissões de CO<sub>2</sub> por MPa de cada traço.

**Figura 11** - Ecoeficiência dos traços em relação à emissão de CO<sub>2</sub> por MPa, em cada idade.

Fonte: Autoria própria (2022).

O concreto com menor emissão de CO<sub>2</sub> por MPa observa-se no traço CB15 na idade de 90 dias, com 6,58 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. Já quando adotada a idade de 28 dias que é a mais usual nos comparativos e análises, segundo pesquisa

bibliográfica, ainda assim, constata-se o traço CB15 com  $7,73 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$ . O pior valor de emissão observa-se no traço CB00, na idade de 7 dias, com emissão de  $11,62 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$ .

Dessa forma, constata-se que o traço mais ecoeficiente é o CB15 (15% de substituição) aos 28 dias, com menor emissão total de  $\text{CO}_2$ , menor consumo de cimento, menor emissão de  $\text{CO}_2$  por MPa e ainda obteve uma ótima resistência de compressão axial, pois como observado na análise pelo método de análise de variância (ANOVA), a resistência dos quatro traços não apresentou diferença significativa aos 28 dias, sendo assim, considera-se a resistência igual nos quatro traços.

Esses menores valores de consumo de cimento e emissão de  $\text{CO}_2$  se devem à maior porcentagem de substituição de cimento por cinza de biomassa, pois segundo os dados bibliográficos, o cimento é um dos componentes do concreto que mais emite  $\text{CO}_2$  ao meio ambiente e, conseguindo-se reduzir essa quantidade de cimento utilizada para produzir o concreto, conseqüentemente consegue-se reduzir a emissão de  $\text{CO}_2$ .

## 5 CONCLUSÕES

O estudo mostrou resultados satisfatórios com a substituição parcial do cimento Portland pela cinza de biomassa. Concluiu-se que o traço mais ecoeficiente aos 28 dias foi o CB15 (15% de substituição de cimento Portland por cinza de biomassa), com a obtenção dos menores valores de consumo de cimento, menor emissão de CO<sub>2</sub> e ainda uma ótima resistência à compressão axial.

Contudo, conclui-se que a substituição parcial do cimento por cinza de biomassa mostra resultados positivos na produção do concreto, pois consome menos cimento evitando a grande extração de recursos naturais e reduz assim a poluição gerada pela emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo produtivo do cimento, em especial do clínquer. Reduz ainda os impasses gerados com a destinação da Cinza de Biomassa pelas indústrias de combustão, que muitas vezes tem dificuldade na destinação e dispêndios onerosos.

Sugere-se para estudos futuros, a análise da interferência do superplastificante nos resultados dos traços e ainda a utilização de porcentagem maiores de substituição de cimento Portland por cinza de biomassa.

## REFERÊNCIAS

AGRELA, F., BELTRAN, M.G., CABRERA, M., LOPEZ, M., ROSALES, J., AYUSO, J. **Properties of Recycled Concrete Manufacturing with All-in Recycled Aggregates and Processed Biomass Bottom Ash.** *Resíduos Biomassa Valor* 9, 1247-1259 (2018).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques de cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado, eu te amo.** Volume 1. 8. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2015

CAMPOS, H. F.; BELLON, A. L.; LARA E SILVA, E. R.; VILLATORE, M. Eco-efficient concrete, optimized by Alfred's particle packing model, with partial replacement of

Portland cement by stone powder. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 15, 2022.

CAO, Feng et al. Effect of highland barley straw ash admixture on properties and microstructure of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125-802, 2022.

CARVALHO, Maria Beatriz Maury de. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal**. 2008.

CELULOSE Irani procura solução para resíduos sólidos. **Anpei News**, 2016. Disponível em: <Celulose Irani procura solução para resíduos sólidos - ANPEI>. Acesso em: 10 de abr. de 2022.

CHATHAM HOUSE. **Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete**. Chatham House - International Affairs Think Tank, 2018.

CORDEIRO, GC; TOLEDO FILHO, RD; FAIRBAIRN, E. de Moraes Rego. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Mater Estrutura** 42, 983-992 (2009).

CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial. **Cimento.org o mundo do cimento**, 2010. Disponível em: <CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial>. Acesso em: 05 de nov. de 2022.

GUEDERT, Luis Otavio et al. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz com material pozolânico**. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico, 1989.

HOPPE FILHO, J., RODRIGUES, C.S., RIBEIRO, L.S.O.P., M. H. F., MEDEIROS. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **J Build Rehabil** 6, 1 (2021).

MARCELLO, Gabriela Artilha. **O uso do cimento e argamassa de cal na construção civil e riscos prejudiciais à saúde**. 2018.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; ARAÚJO, Emanuel Cunha; MEDEIROS-JUNIOR., Ronaldo Alves; PIERALISI, Ricardo. **Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO<sub>2</sub>, resistividade elétrica e migração de cloretos**. 4º Simpósio Paranaense de Patologias nas Construções. ISSN 2526-7248 artigo n. 4SPPC148, pp. 429-438, 2019.

MEHTA, P. K. & MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and Cementitious Materials – Advances in concrete technology**. Amsterdam, 1996.

NAGROCKIENĖ, Džigita; DAUGĖLA, Aurelijus. Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 369-375, 2018.

NASCIMENTO, J. E. F., NÓBREGA, A.C.V., FERREIRA, H.C., NEVES, G.A., SANTANA, L.N.L.. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, p. 85-91, 2019.

PARK, Junghoon; TAE, Sungho; KIM, Taehyung. Life cycle CO<sub>2</sub> assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2940-2946, 2012.

REN, Changzai, WANG, Wenlong, YAO, Yonggang, WU, Shuang, QAMAR, YAO, Xingliang. Complementary use of industrial solid wastes to produce green materials and their role in CO<sub>2</sub> reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, 119840, 10 April 2020.

ROSALES, J., BELTRÁN, MG, CABRERA, M., VELASCO, A., AGRELA, F.. Feasible use of biomass bottom ash as addition in the manufacture of lightweight recycled concrete. **Waste and biomass valorization**, v. 7, n. 4, p. 953-963, 2016.

SANTOS, T., GONÇALVES, J.P. & ANDRADE, H.M.C. Partial replacement of cement with granular marble residue: effects on the properties of cement pastes and reduction of CO<sub>2</sub> emission. **SN Appl. Sci.** 2, 1605 (2020).

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**, 2019. Rio de Janeiro, 2019.

YURT, Ümit; BEKAR, Fatih. Comparative study of hazelnut-shell biomass ash and metakaolin to improve the performance of alkali-activated concrete: **A sustainable greener alternative**, v. 320, p. 126-230, 2022.