

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**GABRIELA ZONTA NUNES**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO COMPACTADO COM  
ROLO PARA PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO (CINZA DE MADEIRA  
MOÍDA)**

Joinville  
2019

**GABRIELA ZONTA NUNES**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO COMPACTADO COM  
ROLO PARA PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO (CINZA DE MADEIRA  
MOÍDA)**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de título de bacharel do Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Profa. Ma. Valéria Bennack.

Joinville

2019

**GABRIELA ZONTA NUNES**

**CONCRETO COMPACTADO COM ROLO PARA PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
RESÍDUO (CINZA DE MADEIRA MOÍDA)**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 28 de junho de 2019.

**Banca Examinadora:**

---

Profa. Ma. Valéria Bennack

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Profa. Dra. Helena Samy Pereira

Centro Universitário – Católica de Santa Catarina

---

Profa. Ma. Juliana Frankowiak

Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, por não medirem esforços para que eu tivesse a oportunidade de ter um estudo de qualidade, não deixassem eu desistir e colaborassem para que meu sonho, virasse o sonho deles também.

Agradeço ao meu namorado, Diego, que foi paciente e sempre esteve ao meu lado, mesmo quando eu achava que não daria conta, me acalmou e mostrou que eu era sim capaz.

Agradeço aos meus irmãos, Bruna e Pedro, por serem exemplo e deixarem eu ser o deles também.

Agradeço à minha orientadora, Professora Valéria, pela orientação, compreensão, confiança e por ser inspiração pessoal e profissional.

Agradeço aos amigos que fiz durante este longo período na faculdade, que sempre estiveram presente e se tornaram indispensáveis nessa caminhada.

Agradeço à minha amiga Victória Rocha Nunes Hoffmann, que foi peça fundamental para finalização desta pesquisa, sempre colaborando e me incentivando.

Agradeço à Perville Engenharia e Empreendimentos pela disposição e por ceder equipamentos fundamentais para realização desta pesquisa.

## RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e os danos a ele gerado vem caracterizando um papel fundamental hoje em dia, principalmente da construção civil, setor que está em constante desenvolvimento na busca de soluções eficazes que agreguem valores aos resíduos com origem no setor e fora dele. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade da utilização da cinza de madeira moída proveniente do processo de combustão incompleta da madeira de Pinus, na produção do concreto compactado com rolo para pavimentação. Primeiramente os agregados e a cinza de madeira moída foram caracterizados de modo a identificar a massa específica, absorção de água e granulometria de cada um deles. Posteriormente definiu-se a dosagem e foram produzidos corpos de prova com formulações com substituições parciais de 5% e 10% do agregado miúdo pela cinza de madeira, além da dosagem referência. Foram realizados os ensaios de consistência, resistência à compressão axial aos 28 dias, porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente. Os resultados indicam aumento da resistência à compressão axial, viabilizando a substituição do agregado miúdo pela cinza de madeira moída.

**Palavras-chave:** CCR. Cinza de madeira. Resíduo.

## **ABSTRACT**

The concern with the environment and damages has been characterizing a fundamental role nowadays, mainly in civil construction, a sector that is constantly searching effective solutions that add values to the residues originating in the sector and outside it. The objective of this work was to analyze the viability of the use of ground wood ash from the incomplete combustion process of Pinus wood in the production of roller-compacted concrete for paving. First, the aggregates and ground ash wood were characterized to identify the specific mass, water absorption and granulometry of each one of them. Then, the dosage was defined and specimens were prepared with formulations with partial substitutions of 5% and 10% of the small aggregate by the wood ash, further the reference dosage. The tests of consistency, axial compressive strength at 28 days, open porosity, water absorption and bulk density were performed. The results indicate an increase in axial compressive strength, making possible the substitution.

**Keywords:** RCC. Wood Ash. Waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção do pavimento. ....	16
Figura 2 - Diagrama de tensões do pavimento flexível. ....	17
Figura 3 - Diagrama de tensões do pavimento rígido.....	18
Figura 4 - Fluxograma etapas. ....	24
Figura 5 - Cimento CP V ARI. ....	25
Figura 6 - Areia média.....	26
Figura 7 - Brita 0.....	27
Figura 8 - Cinza de madeira.....	28
Figura 9 - Moinho de bolas.....	29
Figura 10 - Esferas.....	30
Figura 11 - Agitador eletromagnético com conjunto de peneiras. ....	32
Figura 12 - Molde metálico preenchido de areia. ....	35
Figura 13 - Tubo com agregado miúdo e água. ....	35
Figura 14 - Fluxograma das etapas da preparação do corpos de prova. ....	39
Figura 15 - Prensa Hidráulica – Perville Engenharia e Empreendimentos.....	41
Figura 16 - Pesagens do agregado graúdo A) Saturado sup. seca; B) Saturado submerso; C) Seco em estufa.....	48
Figura 17 - A) Pesagem do cilindro; B) Pesagem cilindro + agregado; C) Proveta com água e agregado no dia do ensaio; D) Proveta com água e agregado após 5 dias.....	49
Figura 18 - A) Cilindro com haste de compactação; B) Proveta com água + cinza de madeira; C) Proveta com água mais cinza de madeira após 5 dias.....	50
Figura 19 - Slump test A) Referência B) Resíduo – 5% C) Resíduo – 10%.....	51
Figura 20 - Corpos de prova moldados. ....	52
Figura 21 - Corpos de prova imersos em água não corrente com cal.....	52
Figura 22 - Corpo de prova desmoldado e identificado.....	53

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulometria agregado miúdo. ....	44
Gráfico 2 - Curva granulometria agregado graúdo. ....	45
Gráfico 3 - Curva granulometria da cinza de madeira. ....	46
Gráfico 4 - Média das resistências à compressão axial. ....	54
Gráfico 5 - Densidade aparente. ....	55
Gráfico 6 - Absorção de água.....	56
Gráfico 7 - Porosidade aberta. ....	56



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do cimento.....	26
Tabela 2 - Massa específica da cinza de madeira. ....	28
Tabela 3 - Características físicas do agregado miúdo. ....	45
Tabela 4 - Características físicas do agregado graúdo. ....	45
Tabela 5 - Características físicas da cinza de madeira .....	46
Tabela 6 - Características físicas da cinza de madeira moída. ....	46
Tabela 7 - Propriedades do agregado miúdo. ....	47
Tabela 8 - Propriedades do agregado graúdo.....	48
Tabela 9 - Absorção de água do agregado miúdo. ....	49
Tabela 10 - Absorção de água do agregado graúdo. ....	49
Tabela 11 - Absorção de água da cinza de madeira.....	50
Tabela 12 - Dosagem.....	51
Tabela 13 - Resistência à compressão axial aos 28 dias.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

% - Porcentagem

°C – Graus Celsius

ABCP – Associação Brasileira de Cimentos Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCR – Concreto compactado com rolo

cm - Centímetro

cm<sup>2</sup> - Centímetro quadrado

cm<sup>3</sup> - Centímetro cúbico

CNT – Confederação Nacional de Transporte

CP – Corpos de prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

g – Gramas

H - Hora

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Kg – Quilograma

m<sup>3</sup> - Metro cúbico

ml – Mililitro

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

N – Newton

NBR – Norma Brasileira

PR – Paraná

SC – Santa Catarina

USACE – United States Army Corps of Engineers

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.2 METODOLOGIA.....	13
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1 MEIO AMBIENTE.....	14
2.2 INFRAESTRUTURA DOS TRANSPORTES.....	15
2.3 PAVIMENTAÇÃO.....	15
<b>2.3.1 Pavimentos Flexíveis</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.2 Pavimentos Rígidos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3.3 Comparativo entre os tipos</b> .....	<b>19</b>
2.4 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO.....	19
2.5 ADIÇÕES MINERAIS.....	21
2.6 CINZA DE MADEIRA.....	22
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 MATERIAIS.....	25
<b>3.1.1 Água</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.2 Cimento</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.3 Agregado miúdo</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1.4 Agregado graúdo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1.5 Cinza de madeira</b> .....	<b>27</b>
3.2 MÉTODOS.....	28
<b>3.2.1 Moagem da cinza de madeira</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2.2 Distribuição granulométrica dos agregados</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2.3 Distribuição granulométrica da cinza de madeira</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.4 Determinação da massa específica do agregado miúdo</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.5 Determinação da absorção de água do agregado miúdo</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.6 Determinação da massa específica e absorção de água do agregado graúdo</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.7 Determinação da absorção de água da cinza de madeira</b> .....	<b>37</b>
3.3 DOSAGEM DO CONCRETO.....	38

3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	38
3.4.1 Mistura dos componentes.....	39
3.4.2 Consistência.....	39
3.4.3 Moldagem.....	40
3.4.4 Acondicionamento.....	40
3.5 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES.....	40
3.6 DENSIDADE APARENTE, POROSIDADE ABERTA E ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	44
4.1.2 Determinação da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	44
4.1.3 Determinação da distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	45
4.1.4 Determinação da distribuição granulométrica da cinza de madeira.....	46
4.1.5 Determinação da massa específica do agregado miúdo.....	47
4.1.6 Determinação da massa específica do agregado graúdo.....	48
4.1.7 Determinação da absorção de água do agregado miúdo.....	48
4.1.8 Determinação da absorção de água do agregado graúdo.....	49
4.1.9 Determinação da absorção de água da cinza de madeira.....	49
4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	50
4.2.1 Definição da dosagem.....	50
4.2.2 Execução dos corpos de prova.....	51
4.2.3 Ensaio de resistência à compressão axial.....	53
4.2.4 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	54
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Raisdorfer (2015), a má destinação dos resíduos oriundos de processos industriais gera preocupação em relação à danos ambientais. O mesmo autor ainda relata que no decorrer dos anos, várias adições e resíduos vem sendo adicionados ao concreto, com intuito de melhorar algumas propriedades específicas para determinada aplicação ou até mesmo reduzir custos de produção.

Uma grande quantidade de resíduos é armazenada como subproduto no mundo todo e o uso destes em substituições parciais de produtos cimentícios se torna uma solução econômica e ambiental (HESAMI *et al.*, 2016).

O resíduo que tem maior destaque na sua utilização, são as cinzas geradas por processos de incineração para geração de energia (CINCOTTO, 1989). A cinza de madeira é um resíduo gerado por vários setores da economia a qual provém da combustão incompleta da madeira quanto utilizada como fonte de energia. Este processo gera toneladas de cinzas, onde a maior parte é destinada aos aterros (BENNACK, 2016).

Entre os tipos de concreto que se destacam por conseguir se adequar ao uso de materiais não convencionais de características cimentícias na composição da mistura, está o concreto compactado com rolo (SILVA, 2016). O concreto compactado com rolo é um concreto com consistência seca, compactado por meio de rolos compressores, não armado e que desempenha simultaneamente funções de base e revestimento (DNIT, 2016).

O presente trabalho busca alternativas para a gestão da cinza de madeira com o intuito de reduzir impactos ambientais gerados pela mesma. Este estudo foi realizado utilizando a cinza de madeira moída em substituição parcial do agregado miúdo na dosagem de concreto compactado com rolo para pavimentação.

### 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos deste trabalho estão apresentados a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar as características físicas e mecânicas do concreto compactado com rolo com adição de cinza de madeira moída.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- ❖ Verificar a viabilidade da utilização do resíduo em artefatos de cimento;
- ❖ Tratar a cinza da madeira [moagem];
- ❖ Caracterizar fisicamente os agregados e a cinza da madeira;
- ❖ Definir o traço de referência para o CCR;
- ❖ Realizar os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias.

## 1.2 METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado no presente trabalho foi o experimental, que segundo Gil (2007), “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que sejam capazes de influenciá-lo definir as formas de controle e de observação de efeitos que a variável produz no objeto.”.

O experimento tem como objetivo substituir parcialmente o agregado miúdo (areia) empregado no concreto compactado com rolo, pelo resíduo cinza de madeira. Sendo assim, foram realizados corpos de prova com substituições parciais de 5% e 10%, além da referência (sem a presença da cinza) e posteriormente foram avaliadas suas propriedades físicas e mecânicas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda assuntos relacionados aos resíduos gerados pelo ser humano e como eles podem degradar o meio ambiente; assim como, possíveis adições destes resíduos ao concreto para pavimentação na área da construção civil. Também são abordados conceitos das malhas viárias brasileiras, dos pavimentos rígidos, flexíveis e do concreto compactado com rolo.

### 2.1 MEIO AMBIENTE

A preocupação com o meio ambiente e os danos a ele causado, vem crescendo cada vez mais. Por isso no decorrer dos anos, o ser humano tenta reutilizar os resíduos gerados para diminuir a poluição (MORAND, 2016).

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente (1981), poluição é uma degradação da qualidade ambiental que direta ou indiretamente prejudica a saúde, segurança e bem-estar da população, cria condições adversas às atividades sociais e econômicas, afeta a biota desfavoravelmente e afeta condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente.

A construção civil é um dos maiores geradores de resíduos de toda a sociedade, onde há estimativas que apontam uma produção mundial de aproximadamente 3 bilhões de toneladas por ano. Por isso é considerada um dos grandes vilões dos impactos ambientais (SEBRAE NACIONAL, 2017).

Conforme Sebrae Nacional (2017), este setor está em constante desenvolvimento para diminuir estes impactos, como por exemplo a consideração do reuso da água em edifícios, utilização de recursos naturais para iluminação e ventilação, racionalização dos processos construtivos e reuso e a reciclagem de resíduos

A cinza da madeira é um resíduo que dificilmente tem uma utilidade diferente da deposição do mesmo no meio ambiente, tornando-se um problema à medida que não é corretamente administrado. Portanto, se houver um destino que possa agregar valor, como por exemplo a aplicação em pavimento de concreto compactado com rolo, será possível, além do reaproveitamento das cinzas, a redução dos impactos por ela gerados ao meio ambiente (SILVA, 2006).

## 2.2 INFRAESTRUTURA DOS TRANSPORTES

Segundo o IBGE (2014), a logística de transporte no território brasileiro, é predominantemente rodoviário e só não predomina na região amazônica, onde se dá por vias fluviais, devida a densa rede hidrográfica natural.

Além disso, a malha rodoviária é responsável por cerca de 60% das mercadorias e 90% do transporte dos passageiros, mesmo enfrentando graves problemas na falta de infraestrutura, onde apenas 12,4% da malha é pavimentada (CNT, 2014).

A Confederação Nacional de Transporte (2014), aponta que dentre a malha pavimentada, 44,7% apresentam desgastes e 19,1% trincas e remendos. Estudos e análises realizados pela confederação, afirmam que o método brasileiro para dimensionar os pavimentos é antigo, sendo essa a principal causa dos desgastes precoces da malha viária brasileira.

Por estes fatores, segundo Silva (2016), é imprescindível a pesquisa de alternativas com potencial, que resultem em estruturas com maior rigidez, para minimizar a ocorrência precoce de patologias como trincas e afundamentos das estruturas.

## 2.3 PAVIMENTAÇÃO

Segundo o DNIT (2016), define pavimento como uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço, teoricamente considerado como infinito.

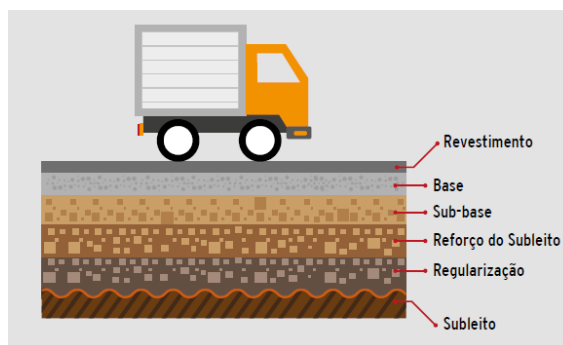
Pavimento é uma estrutura com múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre uma superfície com o objetivo de resistir a esforços do tráfego de veículos e propiciar aos usuários conforto, economia e segurança. (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, com o objetivo de receber e transmitir esforços de maneira a aliviar as pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, a fim de proporcionar ao veículo as condições adequadas de suporte e rolamento, em qualquer condição climática (BALBO, 2007).



Uma seção transversal típica do pavimento com todas as suas camadas, está representado na Figura 1, composta pelo subleito e camadas superiores.

Figura 1: Seção do pavimento.



Fonte: CNT (2017).

As principais camadas que constituem a estrutura de um pavimento e suas funções são:

- A) Subleito: é constituído de material natural consolidado e compactado, definido como terreno de fundação em que é apoiado o pavimento e tem como objetivo absorver os esforços verticais causados pelo tráfego (DNIT, 2006).
- B) Regularização: é uma faixa para nivelar o subleito, com o objetivo de conformá-lo transversal e longitudinalmente, não constituindo propriamente em uma camada de pavimento, podendo ser uma operação reduzida em corte ou uma sobreposição de uma camada com espessura variável sendo ela do próprio subleito ou de uma jazida de empréstimo (DNIT, 2006).
- C) Reforço do subleito: é uma camada de solo de melhor qualidade, que tem como objetivo servir de reforço para o subleito quando necessário, para que a fundação subjacente receba pressões menores e compatíveis com a resistência (BALBO, 2007).
- D) Sub-base: segundo Balbo (2007), quando a camada da base é muito espessa, procura-se por razões construtivas e econômicas, dividi-la em duas camadas criando uma sub-base complementar com menor custo. Sua função é resistir e distribuir esforços verticais provenientes do tráfego, e quando necessário, drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água (CNT, 2017).

- E) Base: é a camada abaixo do revestimento, destinada a resistir e distribuir os esforços do tráfego e está presente apenas nos pavimentos flexíveis (DNIT, 2006).
- F) Revestimento: é composto de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal, pois deverá receber as cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações, resistindo ao desgaste e aumentando a durabilidade do pavimento (BALBO, 2007). Além disso, tem como objetivo melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e a segurança pois recebe diretamente a ação do tráfego (CNT, 2017).

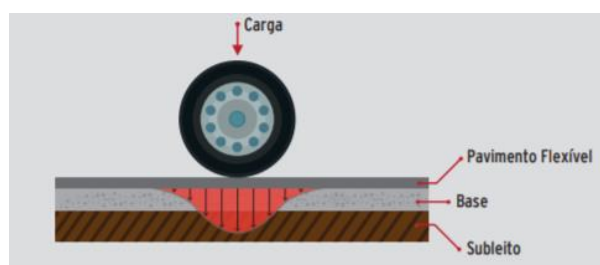
Os pavimentos podem ser classificados em pavimentos rígidos e flexíveis onde a diferença básica é o modo como eles irão transferir a carga recebida pelo tráfego para o subleito (BALBO, 2007).

### 2.3.1 Pavimentos flexíveis

Segundo o DNIT (2016), pavimento flexível, também conhecido como pavimento asfáltico é aquele que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, portanto a carga se distribui praticamente igual em todas as camadas, como mostra a Figura 2.

Mais de 99% da malha rodoviária brasileira é formada por este tipo de pavimento, e dependendo do projeto e da manutenção realizada adequadamente, podem durar de 10 a 20 anos (CNT, 2017).

Figura 2: Diagrama de tensões do pavimento flexível.

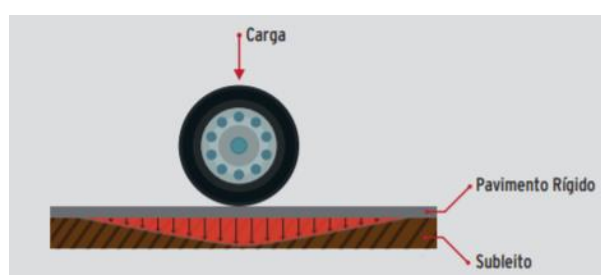


Fonte: CNT (2017).

### 2.3.2 Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos, conhecidos por pavimento de concreto de cimento Portland ou pavimento de concreto-cimento são formados por revestimentos com elevada rigidez, por isso, absorvem grande parte das tensões provenientes do carregamento gerado e as distribuem semelhantemente em toda a extensão da placa com o objetivo de diminuir as tensões aplicadas no subleito, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Diagrama de tensões do pavimento rígido.



Fonte: CNT (2017).

Segundo a CNT (2007), os tipos de concreto rígido são:

- ✓ Pavimentação de concreto simples: pavimento de concreto Portland, onde as tensões são combatidas pelo próprio concreto;
- ✓ Pavimentação do tipo *whitetopping*: pavimento de concreto sobreposto a um pavimento flexível já existente, que atua como sub-base (usado para recuperação de estradas);
- ✓ Pavimentação estruturalmente armada: pavimentação com concreto armado que controla a propagação de fissuras;
- ✓ Pavimentação com peças em concreto pré-moldado: executado a partir de peças pré-moldadas e utilizado em estacionamentos, vias de acesso e locais com baixo tráfego;
- ✓ Pavimentação em concreto compactado com rolo: pavimento também conhecido como rolado e indicado para locais com circulação de veículos em baixa velocidade.

### 2.3.3 Comparativo entre os tipos de pavimento

A Confederação Nacional do Transporte (2017), apresentou uma vasta relação comparativa entre os tipos de pavimento, considerando as principais características, conforme apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Comparativo entre pavimentos.

<b>Características</b>	<b>Pavimentos flexíveis</b>	<b>Pavimentos rígidos</b>
Investimento inicial	Varia de acordo com os materiais utilizados e valores dos insumos por região	Também varia mas é em média, 30% maior em relação ao pavimento flexível
Vida útil	8 a 12 anos	25 a 30 anos
Manutenção	Frequente e complexa	Baixa necessidade e ações simples.
Distribuição de tensões	Carga é distribuída a todas as camadas, que sofrem deformações elásticas significativas	Placa absorve maior parte das tensões e as distribui sobre uma área maior
Materiais utilizados	O asfalto é derivado do petróleo, normalmente misturado a quente, consumindo combustível	O concreto é feito de materiais locais, misturado a frio, consumindo geralmente energia elétrica

Fonte: Adaptado de CNT (2017).

## 2.4 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Concreto de cimento Portland compactado com rolo, concreto rolado ou CCR é um concreto de consistência seca (*“no” slump*), não armado, que desempenha simultaneamente as funções de base, sub-base e revestimento, e possui uma trabalhabilidade que permita ser compactado por rolos compressores, vibratórios ou não (DNIT, 2005). Ainda segundo DNIT (2005), são diferente de concretos convencionais de pavimentação que são adensados por vibradores de imersão ou equipamentos similares.

Segundo Silva (2006), o CCR deve ser suficientemente “seco” para suportar o peso do equipamento de adensamento (rolo liso vibratório) e úmido para permitir a adequada distribuição da pasta ligante na massa de concreto durante as operações

de mistura, compactação e espelhamento para que apresente depois de endurecido as características similares aos do concreto convencional.

Segundo Trichês (1993) *apud* Tayabi e Halpenny (1988) o concreto compactado com rolo é um concreto duro ou de “zero slump”, compactado por rolo vibratório, capaz de apresentar resistência elevada no campo e comportamento equivalente ao do concreto convencional para pavimentação.

A consistência seca, é uma das principais características do concreto compactado com rolo e permite o lançamento de uma próxima camada de concreto, logo após finalizada a anterior possibilitando uma maior velocidade da execução da obra (VOTORANTIM, 2016).

Este concreto é composto pelos mesmos insumos utilizados para a produção do concreto convencional, como o cimento (onde o consumo varia de 80 a 120kg/m<sup>3</sup>, porém outros teores podem ser utilizados para aplicações específicas), brita, areia e água em quantidade que torne a mistura úmida suficiente para não aderir/colar aos rolos compressores (AOKI, 2009).

Segundo Balbo (2007), estes materiais são abundantes em grande parte do território nacional, o que facilita ainda mais o processo de produção e execução. Além disso, o Brasil é um dos maiores produtores de cimento do mundo, tendo produzido aproximadamente 57 milhões no ano de 2016, segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento.

Tagliani (2017) e Harrington *et al.* (2010) citam as principais vantagens do uso do concreto compactado com rolo como:

- ✓ Baixo custo do material;
- ✓ Menor tempo de execução da obra;
- ✓ Alta durabilidade;
- ✓ Melhor suporte quanto as condições adversas das intempéries;
- ✓ Facilidade no transporte (caminhões betoneira ou basculantes);
- ✓ Poucos riscos de surgimento de fissuras;
- ✓ Alta resistência a compressões e às erosões.

O concreto compactado com rolo também é muito utilizado em barragens, além do frequente uso em pavimentação (MILANI, 2003).

Nienkotter (2018) *apud* Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2000), propõe que o uso do CCR seja considerado em locais que o mesmo possa ser transportado, distribuído e compactado com o uso de equipamentos

rolantes, obras de proteção a taludes e projetos que se tornem economicamente mais atrativos.

Descrito por Harrington *et al.* (2010), o concreto compactado com rolo, também pode ser utilizado em obras como estaleiros, portos e docas de carregamentos intermodais, estradas urbanas e rurais com baixo índice de tráfego, estacionamento de aeronaves, acostamentos e grandes estacionamentos comerciais.

## 2.5 ADIÇÕES MINEIRAIS

Segundo a ABNT/NBR 11172 (1990), adições são produtos de origem mineral que ao serem adicionadas aos cimentos, argamassas e concretos tem a capacidade de alterar suas características.

Com a melhoria das propriedades intrínsecas do concreto, é possível alcançar níveis maiores de excelência, pois o uso dessas adições tem proporcionado concretos cada vez mais resistentes e duráveis, melhorando as propriedades do concreto tradicional (SILVA, 1995).

Há várias décadas que as adições minerais vêm sendo utilizadas e suas características são estudadas por vários pesquisadores com objetivos variados, como a modificação da trabalhabilidade, aumento na resistência à compressão, redução nos custos de produção e a destinação correta para os resíduos (RAISDORFER, 2015).

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais podem ser classificadas de três formas, considerando suas ações físico-químicas:

- ✓ Material cimentante: não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes, mas sua hidratação é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação com fins estruturais.
- ✓ Material pozolânico: Possui pouco ou nenhum valor cimentício, pois a pozolana é um material silicioso ou sílico-aluminoso, mas na presença de água reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes.
- ✓ Material não reativo: conhecido também como efeito fíler, não possui atividade química, apenas efeito físico de empacotamento

granulométrico, promovendo o preenchimento dos vazios, aumentando a capacidade e refinamento dos poros da mistura.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), adições podem ser divididas nas categorias:

- ✓ Benefícios da engenharia: o aumento de finos na composição do concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água necessária para alcançar a resistência esperada, com o aumento da resistência, redução da permeabilidade e aumento da resistência a ataques químicos;
- ✓ Benefícios econômicos: é possível reduzir os custos da obra, quando aplicadas substituições de uma parte do cimento Portland (material constituinte mais caro do concreto), uma vez que adições de resíduos ou subprodutos industriais ao concreto diminuem a quantidade de cimento da mistura;
- ✓ Benefícios ecológicos: Diversos resíduos ou subprodutos utilizados como adições em concretos e cimentos contém nas suas composições substâncias tóxicas e poluentes, portanto é correto afirmar que a adição mineral traz benefícios ao meio ambiente.

Segundo Bennack (2018) *apud* CELIK *et al.*, (2014), alguns materiais como cinzas volantes, escórias de alto forno e vários outros tipos de resíduo, são considerados adições minerais, porque podem ser utilizados na fabricação de concreto, reduzindo os impactos gerados no ambiente.

## 2.6 CINZA DE MADEIRA

A indústria madeireira é uma grande geradora de cinzas, que são provenientes da queima da madeira em caldeiras para gerar energia em forma de calor.

Conforme Cincotto (1988), as cinzas de madeira geradas no processo de incineração para geração de energia geram problemas de armazenamento e impacto ambiental, por isso inúmeros estudos propõem uma destinação ecologicamente correta e economicamente viável para este resíduo.

No geral, a composição da cinza de madeira depende de vários fatores, podendo variar da qualidade da madeira até as condições operacionais de geração

desta cinza, mas é possível verificar características que justificam a utilização deste resíduo na construção civil (FOELKEL, 2011).

Segundo Resende (2013), há duas opções de emprego para a cinza de madeira, sendo eles:

- ✓ Substituição parcial ao cimento – agindo como material cimentante;
- ✓ Substituição ao agregado miúdo – agindo como filer (corrigindo a granulometria).

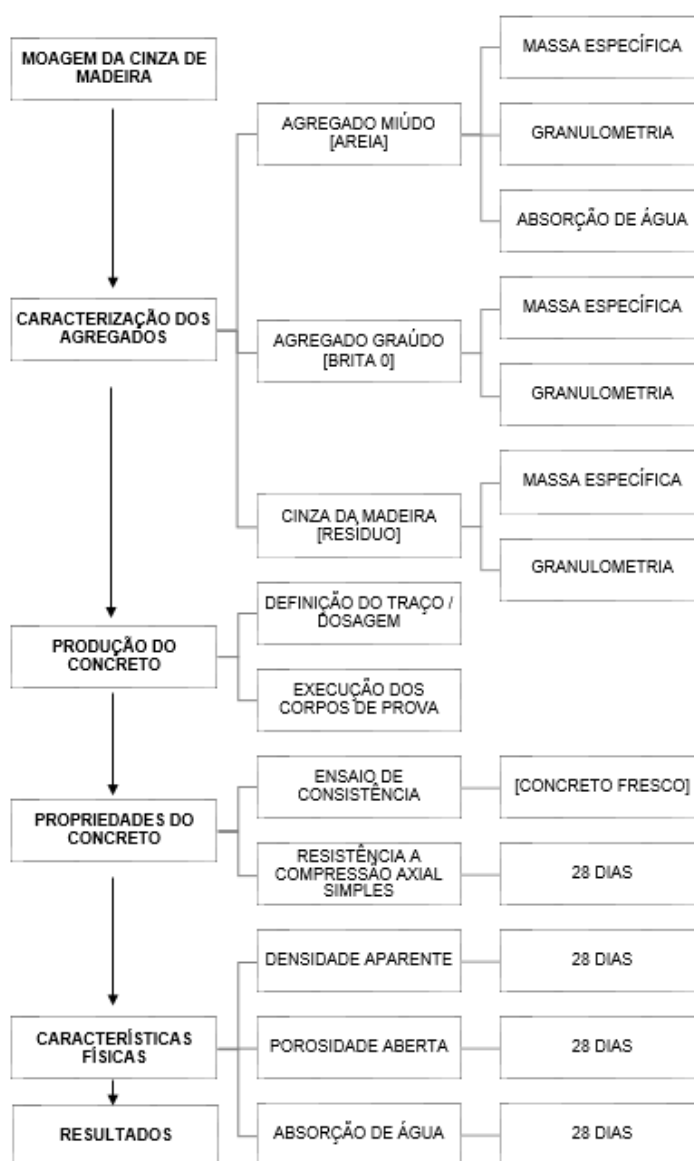
Ainda segundo Resende (2013), a utilização da cinza como adição mineral ao concreto tem influencias em parâmetros como consumo de água, trabalhabilidade do concreto, absorção da água, porosidade e resistência à compressão.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais utilizados na pesquisa experimental e também os ensaios neles realizados. A Figura 4, apresenta as etapas seguidas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 4: Fluxograma etapas.



Fonte: Autora (2019).

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção do concreto compactado com rolo foram água, cimento, brita, areia e a cinza de madeira. Estes materiais foram selecionados de acordo com a disponibilidade na cidade de Joinville, Santa Catarina levando em conta os critérios dos materiais viáveis à produção do CCR.

#### 3.1.1 Água

Toda a água utilizada para produção do CCR foi fornecida pela Companhia Águas de Joinville, empresa pública de saneamento básico da prefeitura de Joinville, responsável pelo tratamento e distribuição de água potável.

#### 3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI – Votoran para obras especiais, ilustrado na Figura 5, que tem a característica de secagem ultrarrápida, além de atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação.

Figura 5: Cimento CP V ARI.



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 1 apresenta as características técnicas do produto.

Tabela 1: Composição do cimento.

Designação normalizada	Sigla	Classe de Resistência	[% em massa]	
			Clínquer + Sulfatos de cálcio	Material carbonático
Cimento Portland de Alta Resistência	CP V	ARI	90 - 100	0 - 10

Fonte: Adaptado de ABCP (2018).

### 3.1.3 Agregado miúdo

Segundo a norma DNIT 056 (2013), é conveniente que neste concreto seja utilizado o pó de pedra, porém Nienkotter (2018), apresentou estudos que mostram que o pó de pedra possui elevada absorção de água. Como a cinza de madeira também apresenta esta característica, o uso do pó de pedra poderia causar a diminuição da trabalhabilidade e das propriedades do concreto. Por este motivo optou-se por fazer a mudança do pó de pedra para areia média, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Areia média.



Fonte: Autora (2019).

### 3.1.4 Agregado graúdo

A norma DNIT 056 (2013), define que a dimensão máxima característica do agregado no concreto compactado com rolo, não deve exceder  $1/3$  da espessura da sub-base ou 32mm, obedecido o menor valor, portanto foi utilizada a brita 0 como mostra a Figura 7, obtida na região de Joinville/SC.

Figura 7: Brita 0.



Fonte: Autora (2019).

### 3.1.5 Cinza de madeira

O resíduo escolhido para utilizar na mistura foi a cinza de madeira (Figura 8), proveniente da combustão incompleta da madeira de Pinus (cascas, galhos, folhas e subprodutos madeireiros) de uma indústria de painéis e produtos de madeira, localizada em Araucária/PR.

Figura 8: Cinza de madeira.



Fonte: Autora (2019).

A cinza de madeira passou pelo processo de moagem, antes de ser inserida na mistura, ficando assim, com sua granulometria mais fina.

A massa específica da cinza de madeira apresentada na Tabela 2, foi caracterizada por Bennack (2016), visto que o resíduo utilizado é proveniente do mesmo local.

Tabela 2: Massa específica da cinza de madeira.

Material	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]
Cinza da madeira	2,78

Fonte: Adaptado de Bennack (2016).

### 3.2 MÉTODOS

Para que pudessem ser realizadas as misturas para execução dos corpos de prova do experimento, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados e da cinza de madeira, no laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina, no campus de Joinville.

### 3.2.1 Moagem da cinza de madeira

Primeiramente, a cinza de madeira passou por um equipamento chamado moinho de bolas, ilustrado na Figura 9, que tem como objetivo diminuir o tamanho das partículas da cinza de madeira.

Figura 9: Moinho de bolas.



Fonte: Autora (2019).

O equipamento é composto por jarros em cerâmica de alta resistência a abrasão, com revestimento completo de alumínio, tampas de nylon e esferas em porcelana. As esferas moem por fricção, por isso, devemos selecionar diferentes diâmetros das mesmas, como mostra a Figura 10, para que haja um maior rendimento da moagem. As esferas maiores atuam na ruptura das partículas de maior tamanho e as menores, têm eficiência na obtenção das partículas menores.

Figura 10: Esferas.



Fonte: Autora (2019).

O volume aparente ocupado pelas bolas foi de aproximadamente 55% do volume do jarro, enquanto o da cinza foi de 40% (o restante foi espaço vazio entre elas).

A cinza foi inserida nos jarros junto com as esferas de porcelana, fechados com a tampa de nylon e então os jarros foram inseridos no equipamento e travados de forma segura. Para obtenção de um bom resultado em relação a finura da cinza, o processo de moagem ocorreu durante cerca de 5 minutos.

### **3.2.2 Distribuição granulométrica dos agregados**

Segundo Dias (2004), a análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas das amostras estudadas e suas respectivas porcentagens de ocorrência. Este processo é necessário pois a composição granulométrica tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. Este processo foi realizado obedecendo as informações nas normas ABNT/NBR 248 (2003) e respeitando os limites da ABNT/NBR 7211 (2009).

Primeiramente os agregados foram secos em uma estufa com a temperatura em aproximadamente 105°C por 24 horas. Após o resfriamento dos materiais, foram separadas duas amostras de 500g de cada agregado para a realização dos ensaios, e o resultado final, foi a média das duas amostras.

Foi necessário limpar as peneiras e então encaixá-las de forma decrescente, de um modo a formarem um único conjunto juntamente com a tampa e o fundo. O conjunto de peneiras utilizado para a realização do ensaio da distribuição granulométrica da areia e da brita 0 foi composto pelas peneiras de 9,5 mm, 6,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm respectivamente.

Independente do agregado, o ensaio é realizado da mesma forma, portanto, a porção de cada amostra foi colocada na primeira peneira do conjunto previamente posicionado no centro do agitador eletromagnético, como mostra a Figura 11. Então a tampa foi inserida e o conjunto travado por um dispositivo de segurança em forma de haste. O processo de agitação mecânica ocorreu por 10 minutos e em seguida, houve o processo de agitação manual para cada peneira, onde o material passante foi adicionado a peneira seguinte. Para o traçado das curvas granulométricas, o material retido em cada peneira foi pesado cuidadosamente, assim como a massa total do conjunto, que não pode ultrapassar o limite de 0,3% de material a mais da amostra seca inicial.

Para a determinação do módulo de finura e do diâmetro máximo característico dos agregados foi utilizada as diretrizes da ABNT/NBR 7211 (2009). O módulo de finura é calculado a partir a soma das porcentagens retidas acumuladas de cada peneira, dividida por 100. E a dimensão máxima característica corresponde a abertura nominal (em milímetros) da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%.



Figura 11: Agitador eletromagnético com conjunto de peneiras.



Fonte: Autora (2019).

### 3.2.3 Distribuição granulométrica cinza de madeira

O ensaio para determinação da granulometria da cinza de madeira seguiu as diretrizes da norma ABNT/NBR 248 (2003). O resíduo foi seco em estufa a 105°C por 24 horas, e duas amostras de 500g foram utilizadas. Estas amostras foram ensaiadas de forma similar ao ensaio descrito no item 3.2.2 Distribuição granulométricas dos agregados, assim como a determinação do módulo de finura e do diâmetro máximo característico.

### 3.2.4 Determinação da massa específica do agregado miúdo

A ABNT/NBR NM 52 define a massa específica como a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo todos os poros permeáveis, que é o que difere da massa específica aparente.

O ensaio foi executado de acordo com as normativas ABNT/NBR NM 52, ABNT/NBR NM 26 e ABNT/NBR NM 27.

Primeiramente foi pesado 500 g do agregado miúdo e despejado no frasco, para obtenção do peso do conjunto. Em seguida foi adicionada água até a marca de 500 ml e movimentado de forma a eliminar as bolhas de ar. Após 1 hora, água foi inserida até a marca de 500cm<sup>3</sup> e pesada novamente.

Por fim, o agregado miúdo foi retirado do frasco, colocado na estufa a 105°C até que a massa se mantivesse constante e após seu esfriamento, pesado.

Para obtenção da massa específica aparente do agregado seco, foi utilizada a Equação 1:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (1)$$

Onde:

$d_1$  – Massa específica aparente do agregado seco ( $\frac{g}{cm^3}$ );

$m$  – Massa da amostra seca em estufa (g);

$V$  – Volume do frasco (cm<sup>3</sup>);

$V_a$  – Volume de água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>).

O volume de água adicionado  $V_a$ , pode ser obtido através da Equação 2:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (2)$$

Onde:

$V_a$  – Volume de água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>);

$m_1$  – Massa do conjunto, frasco + agregado miúdo (g);

$m_2$  – Massa total, frasco + agregado miúdo + água (g);

$\rho_a$  – Massa específica da água ( $\frac{g}{cm^3}$ );

De acordo com a Equação 3, pode ser calculada a massa específica do agregado saturado com superfície seca:

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (3)$$

Onde:

$d_2$  – Massa específica do agregado superfície seca ( $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ );

$m_s$  – Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$V$  – Volume do frasco ( $\text{cm}^3$ );

$V_a$  – Volume de água adicionada ao frasco ( $\text{cm}^3$ ).

Para o cálculo da massa específica, a Equação 4 foi utilizada.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (4)$$

Onde:

$d_3$  – Massa específica do agregado ( $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ );

$m$  – Massa da amostra seca em estufa (g);

$V$  – Volume do frasco ( $\text{cm}^3$ );

$V_a$  – Volume de água adicionada ao frasco ( $\text{cm}^3$ );

$m_s$  – Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$\rho_a$  – massa específica da água ( $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ );

### 3.2.5 Determinação da absorção de água do agregado miúdo

Para determinar a absorção da água do agregado miúdo foram realizadas adaptações no método de Bennack (2016). Um molde metálico com 5 centímetros de diâmetro e 9 centímetros de altura (volume = 192,42  $\text{cm}^3$ ) foi preenchido em camadas compactadas com o agregado miúdo, como mostra a Figura 12.

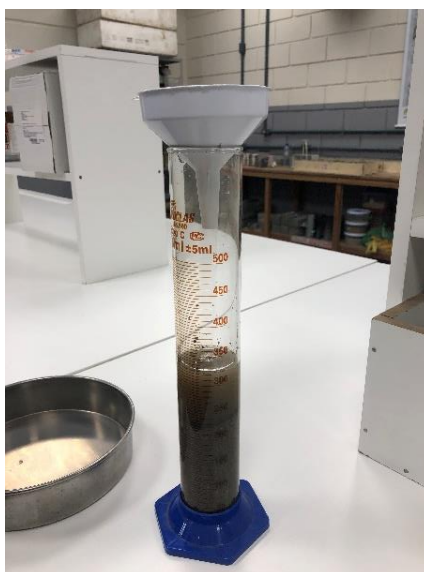
Figura 12: Molde metálico preenchido de areia.



Fonte: Autora (2019).

Em seguida, inseriu-se água na proveta até a marca de 200cm<sup>3</sup> e cuidadosamente mantido em repouso, para que a água depositada nas paredes do frasco, pudesse escoar. Com o auxílio de um funil, foi inserido no tubo todo o agregado miúdo que coube no molde metálico (Figura 13). Após 5 dias, foi feita a leitura do frasco, possibilitando que houvesse absorção completa das partículas.

Figura 13: Tubo com agregado miúdo e água.



Fonte: Autora (2019).

As equações 5 e 6 determinaram a absorção da água.

$$A_{ab} = V_{\text{água+agregado}} - V_f \quad (5)$$

$$A_b = \frac{A_{ab}}{V_{\text{água+agregado}}} \times 100 \quad (6)$$

### 3.2.6 Determinação da massa específica e absorção de água do agregado graúdo

Para a determinação da massa específica do agregado graúdo, foram respeitadas as normas da ABNT/NBR 53 (2009) e ANBT/NBR NM 26 (2009).

Para a execução do ensaio, foi necessária uma balança equipada com um dispositivo adequado que era capaz de manter o recipiente com a amostra suspenso na água, no centro do prato da balança.

A amostra utilizada foi de 2000g que ficou submersa por aproximadamente 24h em água a temperatura ambiente. O agregado graúdo foi retirado da água e envolvido com uma superfície absorvente com a intenção de retirar toda a água visível e imediatamente após este procedimento, a amostra foi pesada.

A massa do agregado graúdo foi registrada, acoplando um cesto a balança que posteriormente teve a amostra de agregado graúdo despejada e submersa em água a temperatura ambiente de aproximadamente 23°C. Por fim, a amostra foi seca na estufa a temperatura de 105°C até que a massa se mantivesse constante e após o resfriamento foi realizada a pesagem final.

Para o cálculo da massa específica, a Equação 7 foi utilizada.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (7)$$

Onde:

$d$  – Massa específica do agregado ( $\frac{g}{cm^3}$ );

$m$  – Massa ao ar da amostra seca (g);

$m_a$  – Massa em água da amostra (g).

A diferença entre  $m - m_a$  é numericamente igual ao volume do agregado, incluindo os vazios permeáveis.

Com a Equação 8, foi calculada a massa específica do agregado graúdo na condição saturado superfície seca.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (8)$$

Onde:

$d_s$  – Massa específica do agregado na condição saturado com superfície seca ( $\frac{g}{cm^3}$ );

$m_s$  – Massa ao ar da amostra na condição saturada com superfície seca (g);

$m_a$  – Massa em água da amostra (g).

A absorção de água do agregado miúdo foi obtida a partir da Equação 9.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$A$  – Absorção da água (%);

$m_s$  – Massa ao ar da amostra na condição saturada com superfície seca (g);

$m$  – Massa ao ar da amostra seca (g).

### 3.2.7 Determinação da absorção de água da cinza de madeira

Para a realização do ensaio de determinação da absorção de água da cinza de madeira foram realizadas adaptações do método de Bennack (2016). Primeiramente a amostra do resíduo foi seca a 105°C por 24 horas. O resíduo foi inserido em camadas compactadas em um molde metálico com 5 centímetros de diâmetro e 9 cm de altura, até que atingisse metade da sua altura. Posteriormente verificou-se o volume ocupado pelo resíduo e a amostra foi pesada.

Em uma proveta foi adicionada 200 ml de água, e a cinza de madeira foi inserida e misturada com o auxílio de um funil e de uma haste de vidro. Após 5 dias foi feita a leitura do frasco e com auxílio das Equações 10 e 11 foi determinada a absorção da cinza de madeira.

$$A_{ab} = V_{\text{água+resíduo}} - V_f \quad (10)$$

$$A_b = \frac{A_{ab}}{V_{\text{água}+\text{resíduo}}} \times 100 \quad (11)$$

### 3.3 DOSAGEM DO CONCRETO

A dosagem de referência do concreto foi baseada nas formulações de Trichês (1993), conforme Equação 12 que relaciona consumo de cimento da mistura, teor de umidade e massa específica do agregado e do cimento.

$$C_c = \frac{1000-V}{\frac{1}{ME_c + ME_{ag} + \frac{h(1+m)}{100}}} \quad (12)$$

Onde:

$C_c$  – Consumo de cimento ( $\frac{kg}{m^3}$ );

$V$  – Volume de vazios da mistura (L);

$m$  – Quantidade de agregado total por quantidade de cimento ( $m^3$  de CCR).

$h$  – Teor de umidade da mistura (%);

$ME_c$  – Massa específica do cimento ( $\frac{kg}{m^3}$ );

$ME_{ag}$  – Massa específica do agregado total ( $cm^3$ ).

O consumo de cimento foi fixado em  $100kg/m^3$  e umidade de 7% sobre a massa seca obtida, resultando no traço 1:10,9:10,9:1,48 (cimento, areia, brita e água).

Foram executadas três formulações, sendo elas a de referência constituída por cimento, areia, brita e água e as outras duas com substituição em massa de 5% e 10% areia pela cinza de madeira.

### 3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

A preparação da mistura do concreto compactado com rolo e a produção dos corpos de prova foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina, no campus de Joinville.

A cinza de madeira, devidamente moída e os agregados foram colocados na estufa a  $105^\circ C$  por aproximadamente 24 horas. Em seguida, os materiais foram pesados de acordo com o traço para a realização do concreto.

A preparação dos corpos de prova seguiu quatro etapas, que estão representadas na Figura 14.

Figura 14: Fluxograma das etapas da preparação do corpos de prova.



Fonte: Autora (2019).

### 3.4.1 Mistura dos componentes

A mistura dos componentes foi realizada em uma betoneira de 140 litros. A sequência de inserção dos materiais para obtenção da mistura foi: brita, cimento, areia, cinza e água. A formulação de referência seguiu a mesma sequência, porém, sem a cinza de madeira.

### 3.4.2 Consistência

Após realizada a mistura dos componentes e produzido o concreto, foi determinado a consistência pelo abatimento de tronco cone, mais conhecido como *slump test*, seguindo as normativas da ABNT/NBR 67 (1998).

Para a realização do ensaio, foi necessário umedecer o molde e a placa base antes de mantê-lo estável, posicionando-se com os pés sob as aletas. Com o molde estável, foi despejado o concreto em três camadas, onde cada camada possuía 1/3



da altura do molde compactado. Cada camada foi compactada uniformemente com 25 golpes utilizando uma haste metálica.

Por fim, foi retirado o cone cuidadosamente e feita a medição da altura final.

A operação completa desde o início do preenchimento do cone até o desmolde não ultrapassou 150 segundos, como indica a ABNT/NBR 67 (1998).

### **3.4.3 Moldagem**

Adaptando as recomendações do DNIT/056 (2013), foram utilizados moldes metálicos cilíndricos de 10x20cm em 3 camadas aproximadamente iguais e cada camada recebeu 25 golpes com o soquete de Proctor modificado de 4,5kg caindo de uma altura de 45 cm.

Como haviam 3 formulações diferentes, foram produzidos 5 corpos de prova para cada uma, totalizando 15 corpos de prova.

### **3.4.4 Acondicionamento**

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e deixados em repouso por 28 dias em água não corrente saturada com cal para então ser realizado o ensaio de resistência à compressão axial.

## **3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES**

O ensaio de compressão simples dos corpos de prova cilíndricos foi realizado na Perville Engenharia e Empreendimentos, empresa situada no Perini Business Park em Joinville/SC. Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias, seguindo as instruções e os cálculos da ABNT/NBR 5739 (2007) e ABNT/NBR 5738 (2015)

A prensa hidráulica (Figura 15), equipamento utilizado para realizar este ensaio, é equipada com dois pratos de aço que devem ser limpos e secos, assim como os corpos de prova antes de serem colocados em posição de ensaio. Além disso, os corpos de prova foram retificados a fim de tornar suas superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal, procedimento imprescindível, segundo a ABNT/NBR 5738 (2015).

Figura 15: Prensa Hidráulica – Perville Engenharia e Empreendimentos.



Fonte: Autora (2019).

A resistência a compressão foi calculada de acordo com a Equação 13:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (13)$$

Onde:

$f_c$  – Resistência a compressão (Mpa);

$F$  – Força máxima alcançada (N);

$D$  – Diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.6 DENSIDADE APARENTE, POROSIDADE ABERTA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

As propriedades do concreto como densidade aparente, porosidade aberta e absorção da água foram obtidas seguindo as diretrizes da ABNT/NBR 9778 (2005) e ABNT/NBR 9779 (2012). Os fragmentos utilizados para a realização dos ensaios, foram coletados dos corpos de prova após o rompimento na execução do ensaio de resistência a compressão simples aos 28 dias.

Primeiramente estes fragmentados foram colocados na estufa a uma temperatura de 105°C por um período de 24 horas e então pesadas para registro da sua massa seca ( $M_s$ ). Posteriormente as amostras foram submersas em água por 72h e sua massa imersa em água ( $M_i$ ) foi registrada, por fim, os fragmentos foram secos superficialmente com auxílio de um papel toalha e registrados sua massa com superfície seca ( $M_{SSS}$ ).

Para determinação das propriedades físicas do concreto foram utilizados os valores das pesagens nas formulações 14, 15 e 16.

$$A = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

$A$  – Absorção da água (%);

$M_{SSS}$  – Massa saturada com superfície seca (kg);

$M_s$  – Massa seca em estufa (kg);

$$\rho = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_i} \quad (15)$$

Onde:

$\rho$  – Densidade aparente ( $\frac{g}{m^3}$ );

$M_{SSS}$  – Massa saturada com superfície seca (kg);

$M_s$  – Massa seca em estufa (kg);

$M_i$  – Massa imersa (kg);

$$P_{abert.} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_i} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

$P_{abert.}$  – Porosidade aberta (%);

$M_{SSS}$  – Massa saturada com superfície seca (kg);

$M_s$  – Massa seca em estufa (kg);

$M_i$  – Massa imersa (kg);

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

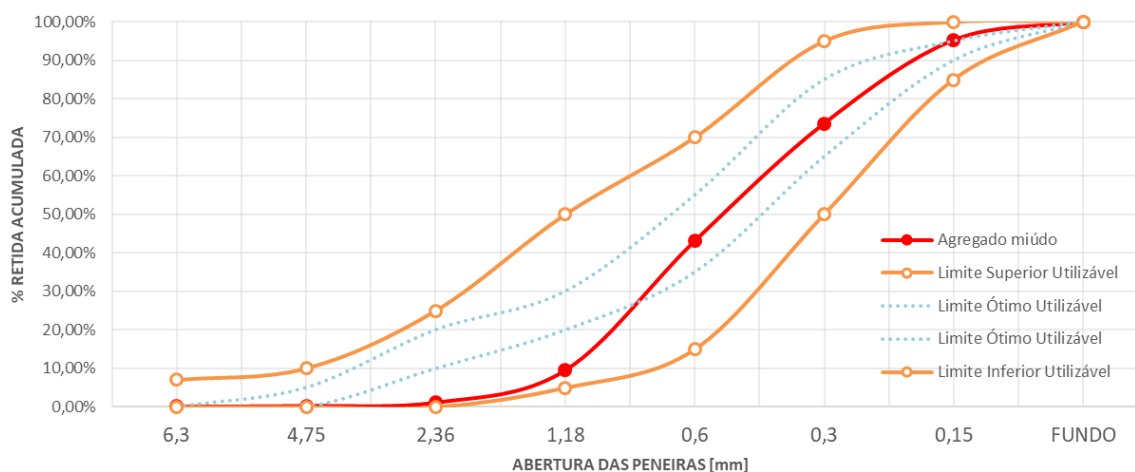
Este capítulo aborda os resultados obtidos na caracterização dos materiais e dos ensaios utilizados na pesquisa, bem como a discussão sobre o uso da cinza de madeira no concreto compactado com rolo em substituição parcial do agregado miúdo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.2 Determinação da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Foi realizado o ensaio de distribuição granulométrica do agregado miúdo e a partir dos dados obtidos, foi possível traçar a curva granulométrica da areia juntamente com os limites estabelecidos na ABNT/NBR 7211 (2005) como mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1: Curva granulométrica agregado miúdo.



Fonte: Autora (2019).

É possível observar que a curva granulométrica do agregado miúdo está dentro dos limites utilizáveis estabelecido na norma, sendo que as características físicas da areia, como módulo de finura e dimensão máxima característica estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características físicas do agregado miúdo.

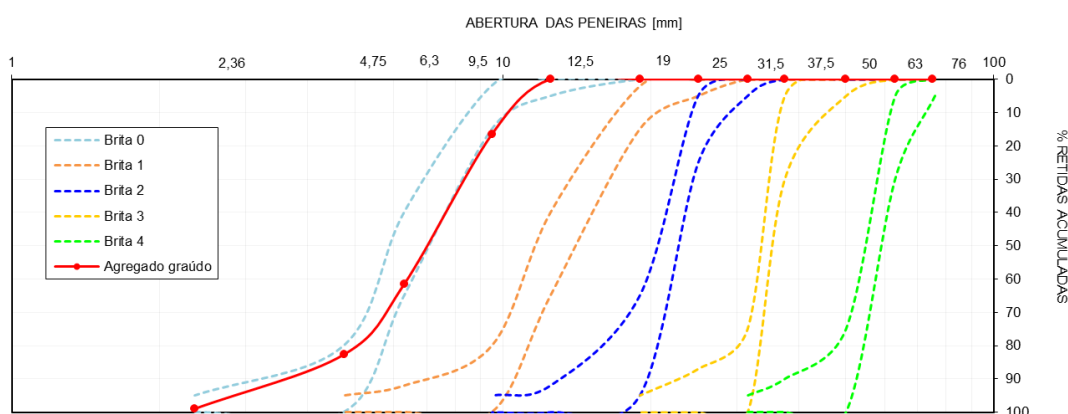
Material	Módulo de finura	Dimensão máx. [mm]
Agregado miúdo	2,23	2,36

Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.3 Determinação da distribuição granulométrica do agregado graúdo

A partir dos dados obtidos no ensaio foi possível traçar a curva granulométrica da brita e comparando com as curvas de classificação dos agregados graúdos verificar/confirmar que a brita utilizada é a zero conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2: Curva granulométrica agregado graúdo.



Fonte: Autora (2019).

O módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado graúdo está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Características físicas do agregado graúdo.

Material	Módulo de finura	Dimensão máx. [mm]
Agregado miúdo	6,41	9,5

Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.4 Determinação da distribuição granulométrica da cinza de madeira

De acordo com o ensaio de granulometria realizado por Achy (2018) o módulo de finura e a dimensão característica máxima da cinza de madeira *in natura* estão representados na Tabela 5.

Tabela 5: Características físicas da cinza de madeira

Material	Módulo de finura	Dimensão máx. [mm]
Cinza de madeira	1,31	4,75

Fonte: Adaptado de Achy (2018).

Contudo, como o objetivo deste trabalho é o tratamento da cinza de madeira para aplicação no concreto compactado com rolo para pavimentação, após a moagem, os valores obtidos das mesmas características físicas, estão representados na Tabela 6.

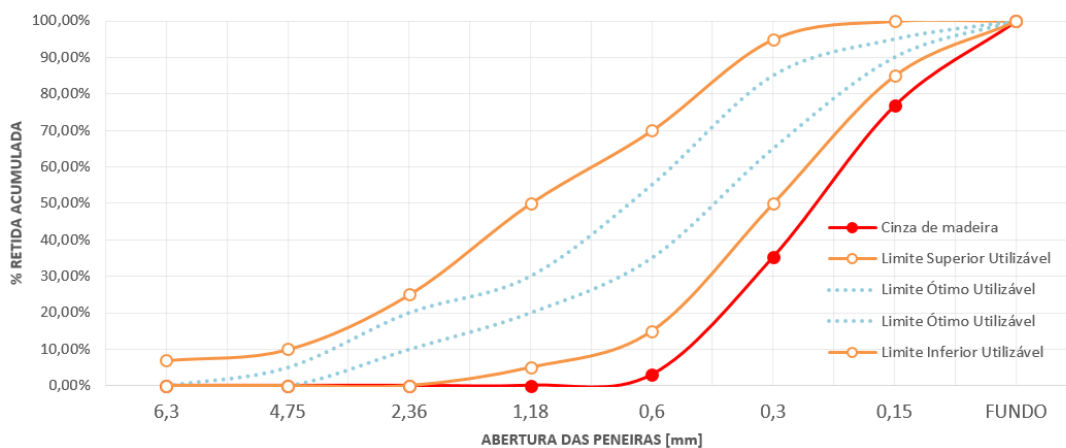
Tabela 6: Características físicas da cinza de madeira moída.

Material	Módulo de finura	Dimensão máx. [mm]
Cinza de madeira	1,14	0,6

Fonte: Autora (2019).

A curva granulométrica da cinza de madeira moída está traçada no Gráfico 3.

Gráfico 3: Curva granulométrica da cinza de madeira.



Fonte: Autora (2019).

Pode-se observar que na análise da curva granulométrica das cinzas moídas em relação aos limites utilizáveis para agregados miúdos, a cinza de madeira se encontra em grande percentual fora dos limites ótimos e utilizáveis. Porém, como o material foi utilizado apenas como substituição parcial do agregado miúdo e em baixos percentuais, foi possível dar continuidade ao estudo.

#### 4.1.5 Determinação da massa específica do agregado miúdo

O ensaio da massa específica foi realizado de acordo com o que prescreve a norma. Os valores da massa específica do agregado miúdo conforme execução descrita no item 3.2.4 Determinação da massa específica do agregado miúdo, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades do agregado miúdo.

Propriedade	Valores [g/cm <sup>3</sup> ]
Massa específica aparente do agregado seco ( $d_1$ )	2,499
Massa específica agregado saturado superfície seca ( $d_2$ )	2,508
Massa específica aparente ( $d_3$ )	2,520

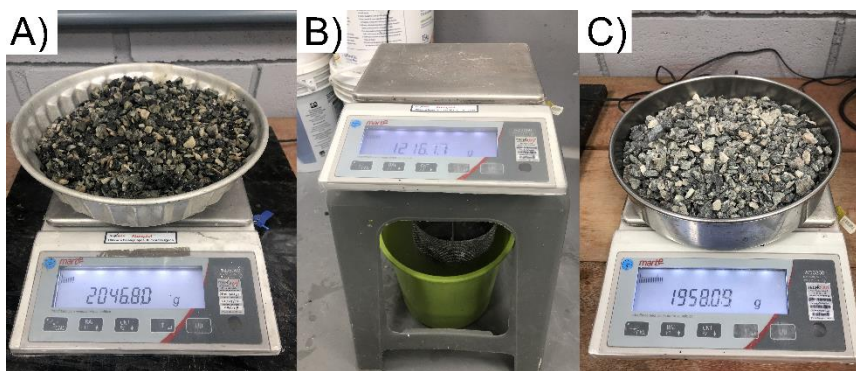
Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.6 Determinação da massa específica do agregado graúdo

As etapas do ensaio para determinação da massa específica do agregado graúdo, pelas pesagens do agregado saturado com superfície seca, saturado submerso e seco em estufa, estão apresentadas na figura 16.



Figura 16: Pesagens do agregado graúdo A) Saturado superfície seca; B) Saturado submerso; C) Seco em estufa



Fonte: Autora (2019).

Os resultados obtidos da massa específica do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades do agregado graúdo.

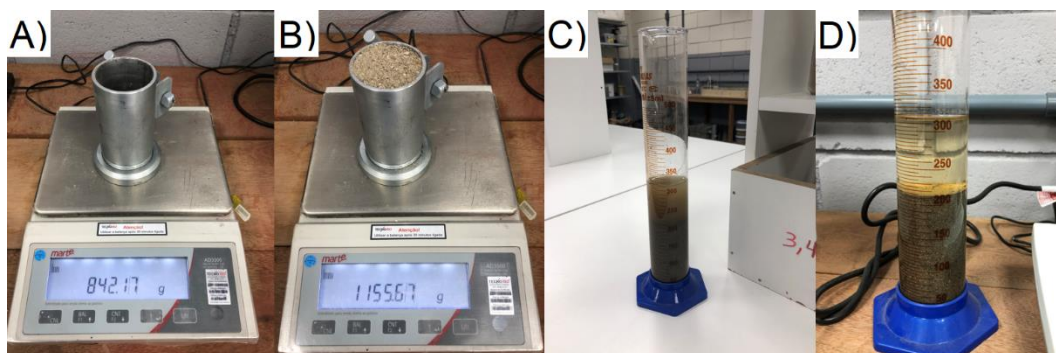
Propriedade	Valores [g/cm <sup>3</sup> ]
Massa específica aparente do agregado seco ( $d$ )	2,64
Massa específica agregado saturado superfície seca ( $d_s$ )	2,46
Massa específica aparente ( $d_a$ )	2,36

Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.7 Determinação da absorção de água do agregado miúdo

A determinação da absorção de água do agregado miúdo foi realizada com base no estudo proposto por Bennack (2016) conforme descrito no item 3.2.5 Determinação da absorção de água do agregado miúdo sendo que as etapas do ensaio estão ilustradas na Figura 17.

Figura 17: A) Pesagem do cilindro; B) Pesagem cilindro + agregado; C) Proveta com água e agregado no dia do ensaio; D) Proveta com água e agregado após 5 dias.



Fonte: Autora (2019).

O resultado obtido na realização do ensaio de absorção de água do agregado miúdo está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Absorção de água do agregado miúdo.

Material	Absorção [%]
Agregado miúdo	18,97

Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.8 Determinação da absorção de água do agregado graúdo

Com os valores das massas do agregado graúdo em diferentes condições, obtidos para a determinação da massa específica do agregado graúdo, também é possível determinar a absorção de água, apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Absorção de água do agregado graúdo.

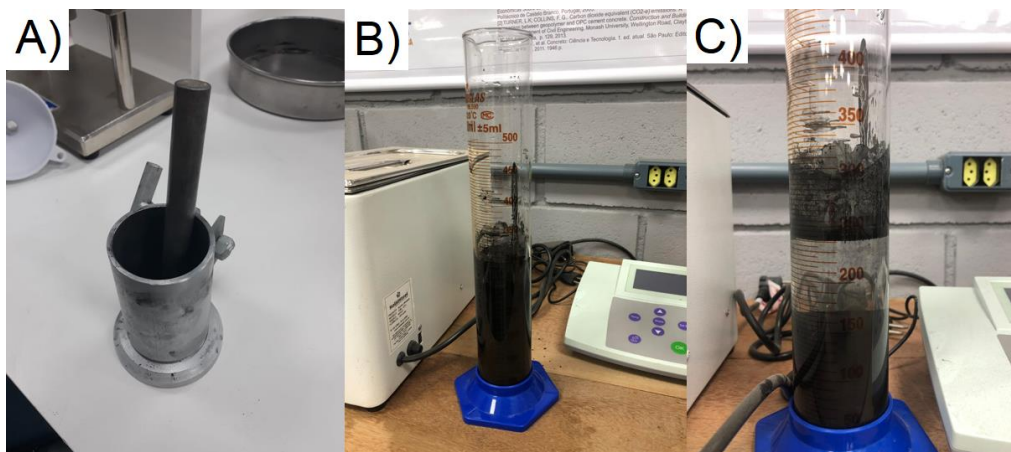
Material	Absorção [%]
Agregado graúdo	4,53

Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.9 Determinação da absorção de água da cinza da madeira

O ensaio de absorção de água da cinza de madeira moída foi realizado de acordo com o procedimento descrito no item 3.1.7 Determinação da absorção de água da cinza de madeira e as etapas estão ilustradas na Figura 18.

Figura 18: A) Cilindro com haste de compactação; B) Proveta com água + cinza de madeira; C) Proveta com água mais cinza de madeira após 5 dias.



Fonte: Autora (2019).

O resultado obtido neste ensaio está apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Absorção de água da cinza de madeira moída.

Material	Absorção [%]
Cinza de madeira	18,97

Fonte: Autora (2019).

## 4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

### 4.2.1 Definição da dosagem

A pesquisa tem como objetivo agregar valor à cinza de madeira, resíduo que se mal administrado, gera impactos ambientais. Portanto, foi realizada a dosagem de referência (com a ausência da cinza de madeira), e outras duas dosagens com a utilização de 5% e 10% de substituição parcial do agregado miúdo, como mostra a Tabela 12, para produção do concreto.

Tabela 12: Dosagem.

Concreto	Cimento	Areia média [g]	Cinza de madeira [g]	Brita 0 [g]
Referência	1000	10850	0	10850
Resíduo - 5%	1000	10307,5	542,5	10850
Resíduo - 10%	1000	9765	1085	10850

Fonte: Autora (2019).

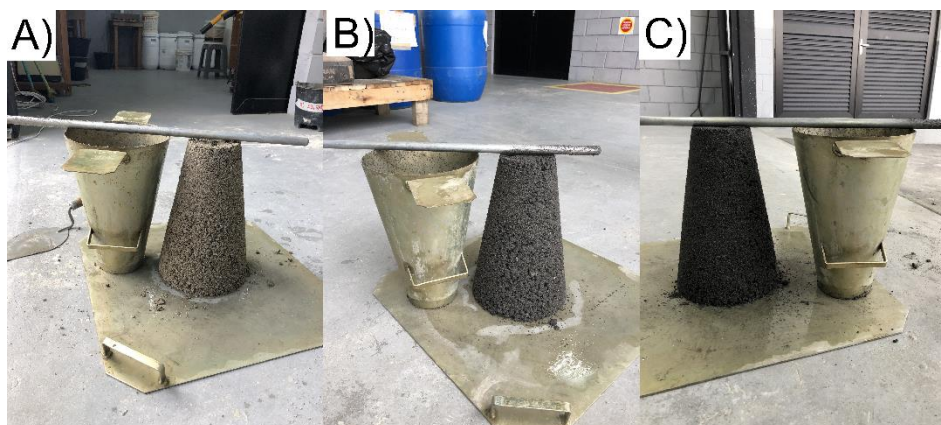
Como a absorção do resíduo é relativamente igual ao do agregado miúdo, manteve-se a relação água/cimento da dosagem.

#### 4.2.2 Execução dos corpos de prova

Após realizados os cálculos das dosagens, iniciou-se o processo de execução dos corpos de prova, onde os materiais foram pesados e misturados na betoneira no laboratório da Universidade Federal de Santa Catarina.

Como citado no referencial teórico, este é um tipo de concreto seco com “no” *slump*, ou seja, o teste de abatimento é igual a zero, como mostra a Figura 19, garantindo que a mistura possua uma umidade ideal para boa compactação.

Figura 19: *Slump test* A) Referência B) Resíduo – 5% C) Resíduo – 10%.



Fonte: Autora (2019).



Após a realização dos testes de abatimento, os corpos de prova foram moldados, curados por 24 h, desmoldados, identificados e então imersos em água não corrente com cal durante 28 dias até a realização do ensaio de compressão axial simples. Alguns destes procedimentos estão ilustrados nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20: Corpos de prova moldados.



Fonte: Autora (2019).

Figura 21: Corpos de prova imersos em água não corrente com cal.



Fonte: Autora (2019).

Figura 22: Corpo de prova desmoldado e identificado.



Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.3 Ensaio de resistência à compressão axial

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial de cada corpo de prova, executado aos 28 dias.

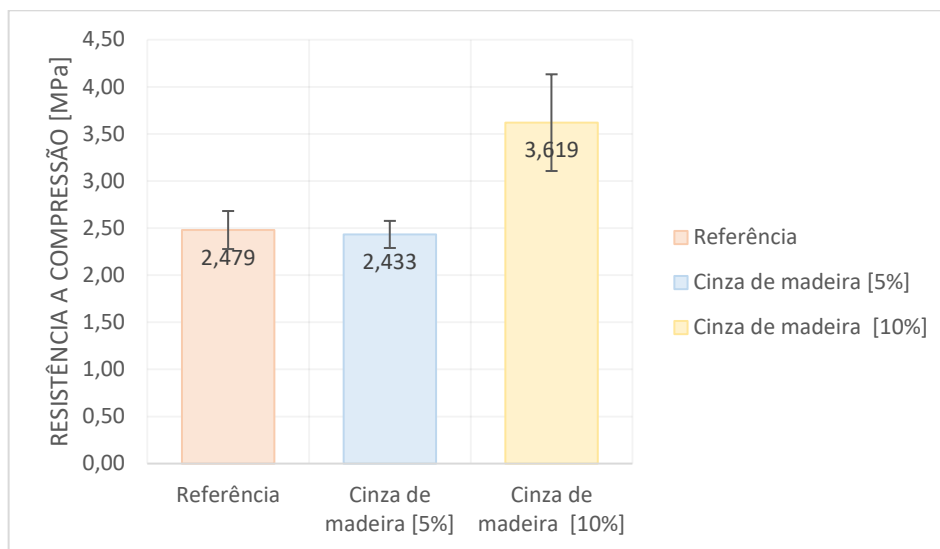
Tabela 13: Resistência à compressão axial aos 28 dias.

Formulação	CP 1 [MPa]	CP 2 [MPa]	CP 3 [MPa]	CP 4 [MPa]	Média [MPa]	Desvio Padrão
Referência	2,336	2,735	2,236	2,611	2,479	0,202
Cinza de madeira [5%]	2,373	2,236	2,623	2,498	2,433	0,144
Cinza de madeira [10%]	4,097	2,848	4,072	3,460	3,619	0,513

Fonte: Autora (2019).

Com base nestas informações, foi possível realizar o Gráfico 4 que apresenta a média dos valores de resistência à compressão para cada formulação.

Gráfico 4: Média das resistências à compressão axial.



Fonte: Autora (2019).

Pode-se perceber que não há melhora significativa nas resistências aos 28 dias da dosagem de referência para a dosagem com 5% de cinza de madeira moída que segundo Baptista (2018) esse comportamento é relativo a cinza de madeira atuar como filler na mistura do CCR. Porém há melhora na resistência à compressão axial quando se trata de uma porcentagem maior de substituição parcial da areia (10% de resíduo).

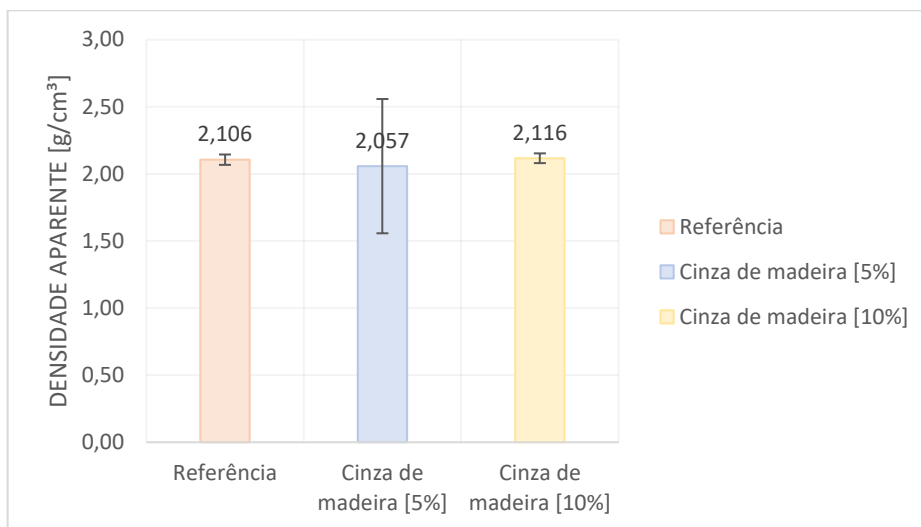
Segundo Bennack (2016) este resultado pode ser explicado pela maior presença de finos proveniente da cinza de madeira, que apesar de não ser um material pozolânico, possui sílica e alumina em sua composição.

#### 4.2.4 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.

Após o rompimento dos corpos de prova, no ensaio de resistência a compressão axial, foram coletados fragmentos para a realização dos ensaios das características físicas.

Com os dados obtidos foi possível realizar o Gráfico 5.

Gráfico 5: Densidade aparente.



Fonte: Autora (2019).

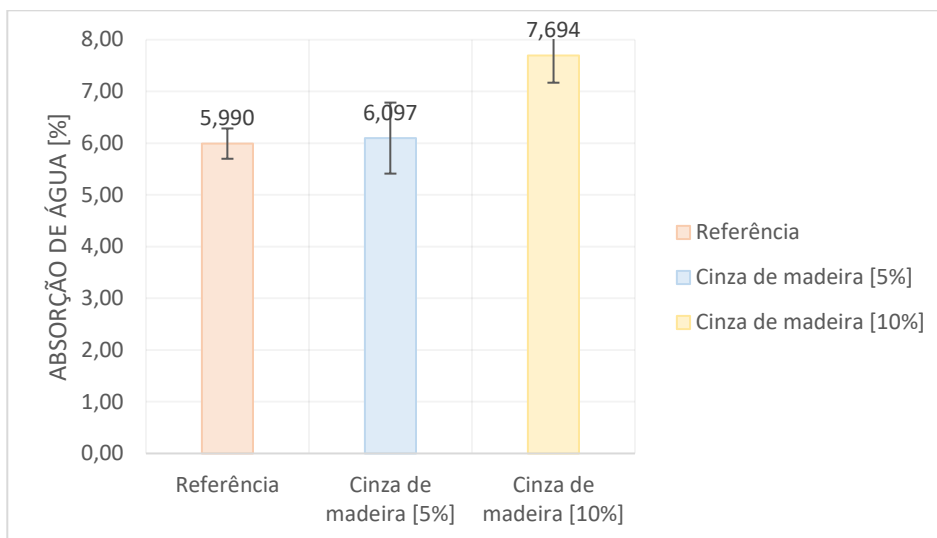
Analisando os resultados e considerando apenas os valores médios, é possível concluir que as dosagens têm densidade aparente aproximadas, o que pode ser justificado pelo fato de que a densidade da areia e da cinza de madeira moída são praticamente iguais. Esta aproximação está relacionada com o fato da densidade da areia e da cinza de madeira moída serem similares,

Além disso, pode-se notar que há um grande desvio padrão na formulação com 5% de cinza de madeira moída que pode ter sido influenciado pela diferença de tamanho dos fragmentos utilizados para este ensaio.

O Gráfico 6 apresenta os dados obtidos para absorção de água das formulações.



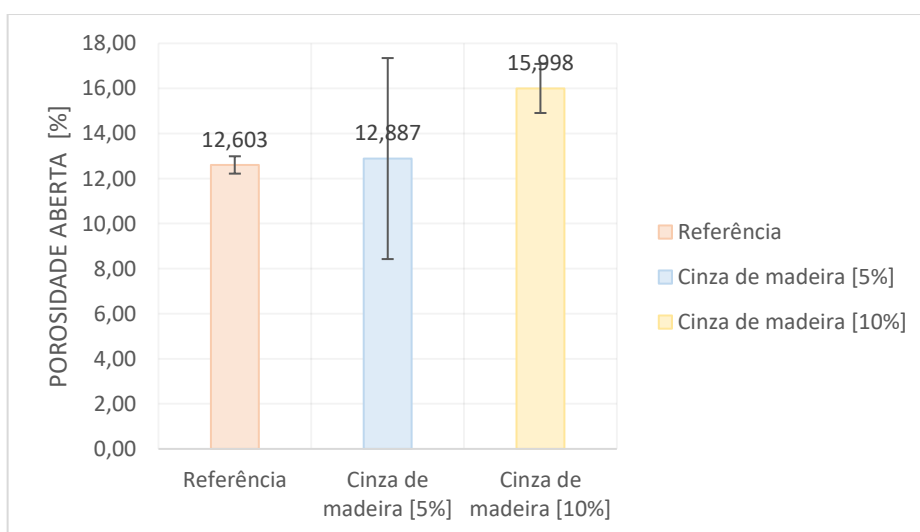
Gráfico 6: Absorção de água.



Fonte: Autora (2019).

Na medida que o teor de cinza aumenta na mistura, é possível perceber um crescimento da absorção de água, de 1,75% e 22,14% nas misturas com 5% e 10% de cinza de madeira moída respectivamente, quando comparadas com a referência. A absorção de água está diretamente relacionada à porosidade aberta, pois quanto maior a absorção de água, maior será a porosidade aberta, como mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7: Porosidade aberta.



Fonte: Autora (2019).

Os corpos de prova com a presença da cinza de madeira, obtiveram maior percentual de porosidade aberta, apresentando um crescimento proporcional com a quantidade de cinza de madeira adicionada. Este comportamento pode estar relacionado ao módulo de finura da cinza, pois quanto maior o percentual de substituição da cinza de madeira moída, maior a absorção de água da mistura pela cinza que, quando no processo de cura, evapora gerando vazios.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a verificação da viabilidade da cinza de madeira moída no concreto compactado com rolo para pavimentação. O estudo experimental foi realizado determinando a resistência à compressão simples e as propriedades físicas da mistura.

A partir dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias, foi constatado que não há aumento significativo dos valores realizando o comparativo da dosagem referência para a dosagem com 5% de cinza, e isso pode ser justificado, pois a cinza atua como filer, por possuir uma granulometria muito fina. Conforme estudo relatado por Moura (2017), a cinza pode ser utilizada como um filer, onde ficará aprisionada entre os grãos da mistura, incorporando no concreto e estabilizando granulometricamente a mistura.

Já para a dosagem com 10% de cinza de madeira moída, ficou evidente que houve melhora na resistência, segundo Bennack (2016) este comportamento pode ser explicado pela atividade pozolânica da cinza, devido à presença considerável de sílica e alumina na sua composição.

De acordo com os ensaios de caracterização física do CCR, nota-se que a absorção de água e porosidade aberta aumentam, na medida que a porcentagem de cinza de madeira é adicionada na mistura. Este fato está relacionado a maior absorção de água da mistura, pela cinza moída, que apesar de apresentar índice de absorção semelhante ao índice do agregado miúdo, tem módulo de finura menor. O que de forma semelhante influencia no processo de cura, cuja água absorvida evapora gerando vazios.

Portanto, conclui-se a partir dos resultados obtidos, que a substituição do agregado miúdo pela cinza de madeira moída é viável, uma vez que, os resultados foram positivos na resistência à compressão axial simples. Portanto, é possível diminuir o impacto ambiental gerado pela deposição das cinzas em aterros, bem como agregar valor a este resíduo.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ❖ Aumentar a dosagem de substituição parcial da cinza de madeira moída;
- ❖ Realizar ensaios de resistência à compressão axial aos 7, 28, 60 e 90 dias com o intuito de acompanhar a evolução da resistência em um período maior;
- ❖ Realização dos corpos de prova com compactação mecânica para avaliação comparativa;
- ❖ Realizar a variação do traço;
- ❖ Diminuir a relação água cimento;
- ❖ Realizar estudo de viabilidade econômica;

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. **NBR 16312-2:** Concreto compactado com rolo – Parte 2: Preparação em laboratório. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172:** Aglomerantes De origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 53:** agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes – DNIT. **DNIT 056/2013:** Pavimento Rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo- Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2013.

ACHY, Aline. **Análise da viabilidade técnica da utilização da cinza de madeira em concreto compactado com rolo em sub-base de pavimentos**. 2018. 71 f. TCC (Graduação) – Programa de graduação em Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

AOKI, Jorge. **Concreto compactado a rolo**. 2009. Disponível em <<https://www.cimentoitambe.com.br/concreto-compactado-a-rolo/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

BALBO, J.T (2007). **Pavimentação asfáltica: Materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP.

BAPTISTA, Karine. **Substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira em concreto compactado com rolo**. 2018. 63 f. TCC (Graduação) – Programa de graduação em Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

BENNACK, Valéria. **Análise de viabilidade técnica da reutilização da cinza de madeira em produtos cimentícios**. 1016. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Catarina. Joinville, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2006.

BRASIL. **Lei nº 6.938**: Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, 1981.

CINCOTTO, M. A. **Tecnologia de Edificações: utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, 1988.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias não duram?** 2017. Disponível em: <<http://anut.org/wpcontent/uploads/2017/10/Pavimentos.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Adições minerais para concreto estrutural**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

FOELKEL, Celso. **Os eucaliptos e os elementos não processuais na fabricação de celulose kraft / Eucalyptus Online Book**. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT24\\_ElementosNproces.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT24_ElementosNproces.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2019.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HARRINGTON, D.; ABDO, F.; ADASKA, W.; HAZAREE, C.V.; CEYLAN, H.; FATIH, B. **Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements**. 2010. intrans. Project Reports. Disponível em: [https://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports/102/](https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102/). Acesso em: 11 nov. 2019.

HESAMI, S.; MODARRES, A.; SOLTANINEJAD, M.; MADANI, H. **Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement**. Construction and Building Materials, 2016.

MALHOTRA, V. M; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials: Advances in concrete technology.** 1. Ed. Ottawa, Canada, 1996.

MILANI FILHO, Luiz. **O uso do concreto compactado com rolo em barragens - tendências futuras.** 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MOURA, Lyneker Souza de. **INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NO APL DE CONFECÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO EM CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE - CBUQ.** 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

MORAND, Fernanda Guerra. **Estudo das principais aplicações dos resíduos de obra como materiais de construção.** 2016. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NIENKÖTTER, Yohana dos Santos Leal. **Adição de cinza de madeira em concreto compactado com rolo como sub-base de pavimentos rígidos.** 2018. 53 f. TCC (Graduação) – Programa de graduação em Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

RAISDORFER, Janderson William. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: efeitos da carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos.** 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar.** 2013. 165 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Ouro Preto, MG, 2013.

SEBRAE. **Gestão de resíduos na construção civil: Redução, Reutilização e Reciclagem.** São Paulo, 2017.

SILVA, Alexandre Jose da. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos.** 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TRICHÊS, G. **Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação – Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento.** 1993. 365 f. Tese (Doutorado) – Programa de doutorado em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, ITA. São José dos Campos, 1993.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design – Roller-compacted Concrete:** EM 1110-2-2006. 2010. Disponível em:

<<http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>>.  
Acesso em: 14 maio 2019.