

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

CAMILA OLIVEIRA CUSTÓDIO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE  
MADEIRA

2018  
CAMILA OLIVEIRA CUSTÓDIO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE  
MADEIRA

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Civil de  
Infraestrutura do Centro Tecnológico de  
Joinville da Universidade Federal de Santa  
Catarina.

Orientadora: Me. Valéria Bennack.

Joinville  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a oportunidade de estudar em uma Universidade Pública, gratuita e de qualidade. Que a educação seja uma prioridade na vida dos Brasileiros. E que os alunos honrem essa oportunidade. Agradeço a cada professor, que mesmo de forma dura e arrogante, me passou algum tipo de conhecimento. Até a raiva foi aprendido.

A minha professora e orientadora Valéria Bennack meu muito obrigada pelo conhecimento compartilhado e pelo apoio durante este percurso. Mais do que orientação, eu e muitos alunos vemos em você um espelho de pessoa e profissional que almejamos ser.

Agradeço as minhas colegas de curso, em especial a Aline Achy, sempre disposta a ajudar e a me orientar durante o semestre.

Agradeço as empresas Autopista Litoral Sul, Perville, Berneck e Universidade Anhanguera, que prontamente cederam espaço, contribuíram com materiais e utensílios indispensáveis para a realização do trabalho.

## RESUMO

O desenvolvimento da construção civil está cada vez mais buscando alternativas para a redução dos impactos ambientais de maneira descomplicada e econômica. O setor industrial além de consumir recursos naturais é responsável pela geração de resíduos que podem sobrecarregar o meio ambiente. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de empregar os resíduos provenientes do processo de combustão da madeira pinus (cinzas) na fabricação de concreto compactado com rolo. O concreto compactado com rolo é uma alternativa de pavimento que além de possuir maior resistência que o pavimento flexível, é mais durável e suporta maiores intervalos de tempo entre sua manutenção. Na primeira fase foi realizada a caracterização dos materiais, posteriormente foram executados em laboratório corpos de prova com a substituição parcial e/ou total do agregado fino por cinza. Os corpos de prova foram analisados quanto à resistência à compressão axial e à resistência diametral. Avaliação da densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água também foi realizada. Os resultados indicam a viabilidade da substituição.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Cinza mineral. Concreto compactado com rolo.

## **ABSTRACT**

The development of civil construction is increasingly seeking alternatives for reducing environmental impacts in an uncomplicated and economical way. The construction industry, besides consuming natural resources, is responsible for the generation of waste that can overwhelm the environment. The objective of this study is to analyze the feasibility of using the waste from the combustion process of Pinus wood (wood ash) in the manufacture of compacted concrete. Road roller compacted concrete is an alternative method that, in addition of having greater strength than the flexible pavement, is more durable and supports longer time intervals of maintenance. In the first phase, the characterization of the materials was performed. In the second moment, compacted concrete samples were created, these samples had its aggregates partially and/or totally replaced by wood ash. The samples were analyzed for axial compression strength and diametrical resistance. Evaluation of the apparent density, open porosity and water absorption were also considered. The results of this study indicate that this substitution can be considered in real applications studies.

**Keywords:** Sustainability. Mineral ash. Road roller compacted concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição das camadas do pavimento flexível.....	14
Figura 2 - Diagrama de tensões em pavimento flexível.....	15
Figura 3 - Composição das camadas do pavimento rígido.....	15
Figura 4 - Diagrama de tensões em pavimento rígido.....	16
Figura 5 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	23
Figura 6 – Areia.....	25
Figura 7 - Brita zero.....	26
Figura 8 - Cimento Portland V ARI.....	27
Figura 9 - Cinza de madeira.....	27
Figura 10 - Ensaio de granulometria.....	30
Figura 11 - Frasco Chapman.....	31
Figura 12 - Fluxograma da execução dos corpos de prova.....	35
Figura 13 - Fluxograma de execução do Slump Test.....	36
Figura 14 - Equipamentos para <i>Slump Test</i> .....	36
Figura 15 – Máquina de ensaio de compressão axial.....	37
Figura 16 - Resultado <i>Slump Test (A)</i> .....	44
Figura 17 - Resultado <i>Slump Test (B)</i> .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença entre pavimento de concreto convencional e CCR. ....	19
Tabela 2 - Benefícios e limitações da aplicação do CCR. ....	20
Tabela 3 - Composição do Cimento Portland V ARI. ....	26
Tabela 4 - Características físicas da cinza de madeira.....	28
Tabela 5 - Fator de correção de acordo com a relação altura/diâmetro do corpo de prova .....	38
Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo .....	42
Tabela 7 - Características físicas do agregado graúdo.....	43
Tabela 8 - Dosagem dos materiais para o concreto .....	43
Tabela 9 - Características físicas dos corpos de prova. ....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de composição granulométrica da cinza da madeira.....	28
Gráfico 2 - Curva de composição granulométrica do agregado miúdo .....	41
Gráfico 3 - Curva de composição granulométrica do agregado graúdo.....	42
Gráfico 4 - Resistência à compressão simples aos 7 dias.....	46
Gráfico 5 - Resistência à compressão simples aos 28 dias.....	47
Gráfico 6 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	48
Gráfico 7 - Densidade Aparente.....	49
Gráfico 8 - Absorção de Água .....	50
Gráfico 9 - Porosidade Aberta.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C – Graus Celcius;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CCR – Concreto compactado com rolo;

CIB - Conselho Internacional da Construção;

CNT - Confederação Nacional do Transporte;

CP – Corpo de prova;

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes;

FDC - Fundação Dom Cabral;

FEM - Fórum Econômico Mundial;

g – Grama;

g/cm<sup>3</sup> - Grama por centímetro cúbico;

h – Hora;

kg/m<sup>3</sup> – Quilograma por metro cúbico;

km – Quilômetros;

mm – Milímetros;

MMA - Ministério do Meio Ambiente;

MPa – Mega Pascal;

N – Newtons;

NBR – Norma Brasileira;

NM – Norma Mercosul;

s – Segundos;

ton – Toneladas;

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS .....	12
1.1.1 Objetivo Geral .....	12
1.1.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1 MALHA VIÁRIA .....	13
2.2 PAVIMENTAÇÃO .....	14
<b>2.2.1 Pavimento rígido</b> .....	<b>16</b>
2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO.....	17
<b>2.3.1 Emprego do CCR no Mundo</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.2 Emprego do CCR no Brasil</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3.3 CCR</b> .....	<b>18</b>
2.4 ADIÇÕES MINERAIS .....	21
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
3.1 MATERIAIS .....	24
3.1.1 Água .....	24
3.1.2 Agregado miúdo .....	24
3.1.3 Agregado Graúdo .....	25
3.1.4 Cimento .....	26
3.1.5 Cinza de madeira .....	27
3.2 MÉTODOS .....	28
3.2.1 Distribuição granulométrica.....	28
3.2.2 Determinação da massa específica e absorção de água do agregado miúdo. .....	30
3.2.3 Determinação de massa específica e absorção de água do agregado graúdo. ....	33
3.2.4 Preparação do concreto e moldagem dos corpos de prova .....	34
3.2.5 Ensaio de Consistência – <i>Slump Test</i> .....	35
3.2.6 Ensaio de Resistência a Compressão Simples .....	37
3.2.7 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	38
3.2.8 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água .....	39

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	41
<b>4.1.1 Agregado Miúdo .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.2 Agregado Graúdo .....</b>	<b>42</b>
4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	43
<b>4.2.1 Moldagem dos Corpos-de-Prova .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2 Ensaio de Consistência .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.4 Densidade Aparente, Porosidade Aberta e Absorção de Água.....</b>	<b>48</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>52</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A globalização econômica é responsável pelo desenvolvimento das relações internacionais, porém muitas vezes age de forma opressora e inexoravelmente aumenta o processo de degradação ambiental nas nações mais pobres, que são condicionadas a utilizar seus recursos naturais de forma desordenada (PISKE, 2011). O mesmo autor ainda relata a preocupação com a sustentabilidade ambiental ao longo das últimas décadas fomentando discussões e exigindo novos padrões de desenvolvimento sustentável.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (BRASIL, 2012), o Conselho Internacional da Construção (CIB) aponta a indústria da construção como o setor que mais consome recursos naturais. Ainda, que o maior obstáculo para a construção civil no Brasil consiste na otimização do consumo de recursos e energia, controle de resíduos gerados e preservação do ambiente natural, fazendo o vínculo de forma inteligente entre ambiente construído e ambiente natural.

Uma matéria prima consumida com profusão é a madeira, apenas as indústrias do setor de cerâmica vermelha são responsáveis mensalmente por mais de 300 toneladas de cinzas, resíduo proveniente da combustão de eucalipto (BORLINI *et al.*, 2005). Porém a falta de fiscalização e regularização no descarte torna-se um problema maior a cada ano (ARAUJO *et al.*, 2016).

Gluitz e Marafão (2013) dizem que uma possibilidade para redução da utilização de matérias primas não renováveis seria a inserção dos resíduos provenientes de outros setores na construção civil.

O Brasil tem hoje como principal modal de transporte o sistema rodoviário, que teve seu ápice de desenvolvimento ao longo do século XX, pois o processo de industrialização da época demandava maior integração territorial (fernán *et al.*, 2011) sendo que a progressiva demanda no setor rodoviário vem ocasionando a degradação dos pavimentos (FEDRIGO *et al.*, 2014).

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), "Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessura finitas, assentes sobre um semi-espaco considerado teoricamente como infinito. [...] de uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos." .

A utilização de pavimento rígido como alternativa para a pavimentação tem sido amplamente aplicada em estradas de primeira categoria em vias urbanas de alto tráfego de muitos países (BERNUCCI *et al.*, 2008). Dentre as técnicas de execução do pavimento rígido, o Concreto Compactado com Rolo (CCR), geralmente é a escolha indicada por apresentar desempenho superior em relação a capacidade de suporte e propriedades elásticas do pavimento (FEDRIGO *et al.*, 2014).

O CCR é uma alternativa prática e econômica, capaz de solucionar parte dessa demanda de infraestrutura de rodovias (TOFFOLO, 2015), é caracterizado por possuir uma mistura de baixa dosagem de cimento, tem alta aplicação em casos onde o pavimento não exige alta performance de resistência mecânica (RIBEIRO; ALMEIDA, 2000).

Este trabalho tem como objetivo propor uma alternativa satisfatória para o uso sustentável de resíduo proveniente da queima de biomassa (cinza da madeira de reflorestamento pinus) como adição ao CCR para pavimentação.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão apresentados a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento mecânico do CCR quando da substituição parcial do agregado miúdo por cinza proveniente da queima da madeira pinus.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os agregados quanto granulometria, massa específica e absorção de água;
- Estabelecer os percentuais de substituição de agregado miúdo por cinza;
- Verificar a resistência mecânica à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral do CCR;
- Análises de características físicas do CCR, sendo elas densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MALHA VIÁRIA

A densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil ainda é muito pequena, mesmo sendo o modal de transporte com maior demanda (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2014). De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), são aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional.

A expansão da malha rodoviária também não acompanhou o ritmo de crescimento da frota de veículos, sendo que nos últimos dez anos houve um aumento de 110,4% de veículos motores, enquanto as rodovias federais cresceram apenas 11,7% (CNT, 2016).

Segundo a Fundação Dom Cabral (FDC) e o Fórum Econômico Mundial (FEM) (2009) o Brasil tem a terceira malha rodoviária mais extensa do mundo, a persistência na nacional neste modal se deve a grande parcela de cargas que atravessam o país, aos custos relativos de construção das vias e ao foco de curto prazo dos investimentos. Além da falta de investimento em novas vias, grande parte dos trechos que possuem pavimento não se encontra nas condições ideais de utilização (IBGE, 2014).

De acordo com o levantamento da CNT (2017), dois terços das rodovias do país encontram-se na classificação regular, ruim ou péssima, sendo que a grande dependência do modal rodoviário no Brasil e a má qualidade da infraestrutura viária são problemas significativos para o setor industrial, que equivale a 80% dos transportes realizados pelas companhias.

Segundo Silva (2006), o cenário caótico de degradação precoce do pavimento rodoviário acentua a necessidade de busca por novas tecnologias que garantam estruturas de melhor qualidade, com redução de trincas e afundamentos dos pavimentos.

## 2.2 PAVIMENTAÇÃO

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada técnica e economicamente a resistir e distribuir as solicitações verticais provenientes do tráfego; propiciar condições confortáveis e seguras de rolamento; resistir ao desgaste de uso e do tempo (SENÇO, 2001).

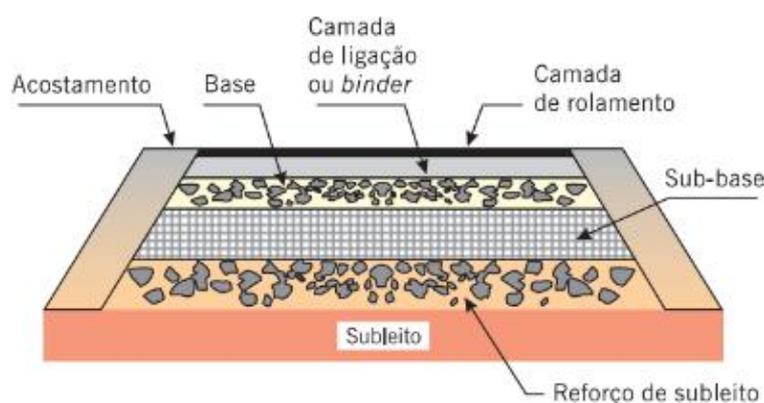
Balbo (2007) diz que o pavimento é composto por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, adequada para atender estruturalmente e operacionalmente a demanda de tráfego e ao menor custo, sendo a manutenção e uso adequado, quesitos obrigatórios.

Conforme Danieleski (2004), os objetivos principais do pavimento são: conforto de trafegabilidade, capacidade de suportar e distribuir cargas previamente dimensionadas, segurança e conforto visual, sendo este último ligado à sua estética. Dessa forma, sob o parecer técnico e do usuário, um bom pavimento é aquele cuja superfície esteja apropriada (sem buracos e/ou trincas), suportando cargas, com ligação segura entre pneu e superfície, tanto em rolamento quanto na frenagem.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006) os pavimentos podem ser divididos em basicamente dois tipos: rígidos e flexíveis.

O pavimento flexível, também chamado de pavimento asfáltico, é composto por várias camadas (Figura 1) denominadas subleito, reforço do subleito, sub-base, base e por fim, é revestido com materiais betuminosos ou asfáltico, dependendo do caso, o projeto poderá apresentar ausência de algumas camadas.

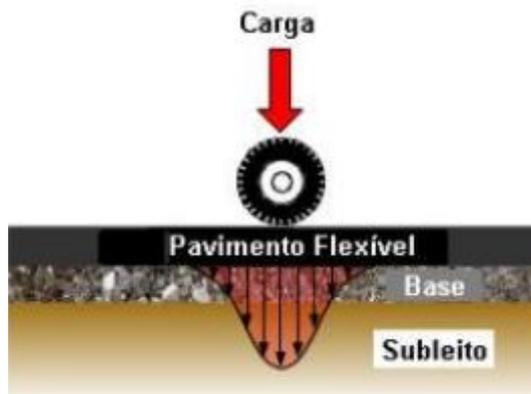
Figura 1 - Composição das camadas do pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

As camadas possuem a função de receber, distribuir e absorver as solicitações oriundas do tráfego. Todas as camadas sofrem deformação elástica significativa (Figura 2) sob o carregamento aplicado, ocorrendo a distribuição da carga (DNIT, 2006).

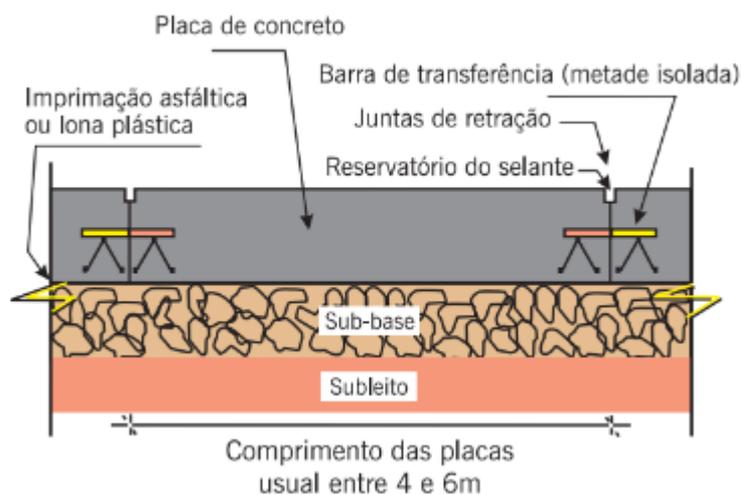
Figura 2 - Diagrama de tensões em pavimento flexível



Fonte: Araújo *et al.*, 2016.

O pavimento rígido, que é conhecido como pavimento de concreto de cimento Portland ou pavimento de concreto-cimento, possui como revestimento uma placa de concreto (Figura 3), armada ou não com barras de aço (Bernucci *et al.*, 2006).

Figura 3 - Composição das camadas do pavimento rígido.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Este tipo de pavimento possui uma elevada rigidez na camada superior em relação às camadas inferiores (Figura 4), portanto, logo na primeira camada há a absorção de grande parte das tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

Figura 4 - Diagrama de tensões em pavimento rígido.



Fonte: Araújo *et al.*, 2016.

De acordo com o DNIT (2006), o pavimento ainda pode apresentar a classificação semi-rígido, quando formado por uma base rígida, com propriedades cimentícias e revestimento asfáltico.

Dentre os tipos de pavimentos rígidos, tem-se o Concreto Compactado com Rolo (CCR), conhecido também como concreto seco ou concreto rolado. Silva (2006) comenta que este pavimento merece aprofundamento em suas pesquisas, visto que possui os atrativos de facilidade de execução, durabilidade, resistência, baixa deformação e também, absorve e distribui melhor os carregamentos do tráfego.

### 2.2.1 Pavimento Rígido

O pavimento rígido é adotado como alternativa para pavimentação de estradas a mais de um século, sendo que os primeiros pavimentos de concreto de que se tem notícia datam de 1865, na Escócia, desde então a tecnologia é aplicada com sucesso em estradas em todo o mundo (BRAVO, 2000).

O pavimento rígido é preferência em estradas de primeira categoria em muitos países, como por exemplo, Japão, Alemanha, Itália, Inglaterra e Bélgica, que possuem aproximadamente 50% de suas estradas em concreto (PACE *et al.*, 2000).

Nos Estados Unidos a porcentagem é de cerca de 26%, tendo sido o primeiro pavimento de concreto executado em Ohio, na Av. Main, Bellafontaine, há 125 anos (1893) sem danos consideráveis ou necessidade de reconstrução (PACE *et al.*, 2000).

No Brasil e na América Latina a construção de pavimentos de concreto não teve um desenvolvimento linear. Houve o entusiasmo inicial por meados de 1920 a

1950 e um estancamento considerável após isso, em função da preferência dos pavimentos asfálticos pelo menor investimento inicial (SILVA *et al.*, 2006).

Ainda, conforme o autor, com o aumento das parcerias público-privadas no Brasil vem ocorrendo uma maior procura do pavimento rígido, motivada pelo custo total relativo à vida do pavimento e não apenas ao custo inicial.

Durabilidade e resistência são os benefícios do pavimento rígido sobre o flexível, sendo que o rígido apresenta durabilidade e vida útil estimada em 30 anos, com necessidade de intervenções de manutenção mínimas, e o flexível é concebido para uma vida 10 anos. A maior vida útil e menor necessidade de manutenção pode diluir o maior investimento inicial do pavimento rígido (LOTURCO, 2017).

De acordo com o DNIT (2006), o pavimento rígido de cimento Portland estruturalmente armado, possui o revestimento com uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores. A espessura da placa é fixada em função da resistência à flexão da placa e da resistência das camadas subjacentes (BERNUCCI *et al.*, 2008). A aplicação do pavimento rígido no Brasil tende a aumentar visto as vantagens em comparação ao pavimento flexível e motivado pelo intenso fluxo de tráfego pesado (CNT, 2017).

De acordo com Bauer (1995), a estrutura dos pavimentos flexíveis sujeita o pavimento a deformações permanentes, por isso as rodovias e vias urbanas com tráfego intenso ou tráfego pesado e lento devem ser construídas com concreto, porque não deformam. Da mesma forma, o concreto oferece maior aderência dos pneus em relação ao asfalto, reduzindo o risco de acidentes, e é impermeável, impedindo a infiltração de água e formação de buracos na estrutura (MESQUITA, 2001).

## 2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

### 2.3.1 Emprego do CCR no Mundo

O conceito de concreto compactado com rolo surgiu após a segunda guerra mundial, quando a indústria de equipamentos pesados tornou viável a utilização dos equipamentos de terraplenagem e o desenvolvimento intenso das barragens (MARQUES, 2001). O autor ainda acrescenta que a ideia era otimizar o processo executivo de barragens de concreto com equipamentos semelhantes aos utilizados

nas obras de terra, utilizando um concreto que suportasse o tráfego de equipamento de transporte, espalhamento e compactação.

A primeira aplicação do concreto compactado com rolo foi em pavimentos de regularização, principalmente como base para o pavimento de pistas de grande carga e impacto, como as aeroportuárias, sendo denominada de técnica de mistura pobre, com materiais grosseiros, para aplicações secundárias (MARQUES, 2001).

### **2.3.2 Emprego do CCR no Brasil**

A prefeitura de Porto Alegre – RS foi pioneira no Brasil em pavimentação com o uso do CCR, em 1972, empregando como camada de base de pavimento semirrígido nas avenidas Sertório, Bento Gonçalves, 1 e 2 Perimetrais e Osvaldo Aranha (CARVALHO, 1987).

Os primeiros estudos de CCR em barragens foram desenvolvidos na Itaipu Binacional, em 1987 na rampa de acesso e nas adufas de desvio e a primeira execução ocorreu em 1986 na barragem de Saco de Nova Olinda, na Paraíba (ANDRIOLO, 1989; MARQUES 2001).

### **2.3.3 CCR**

O concreto compactado com rolo (CCR) é composto de cimento Portland e compactado por meio de rolos compressores vibratórios, utilizado principalmente para a execução de sub-base de pavimento rígido (DNIT, 2013). Deve ser dosado por método racional, de modo a se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada para ser compactada com o rolo liso vibratório, resultando um produto final com a resistência à compactação exigida pela Norma DNIT 056/2013-ES (DNIT, 2013). Para prover as características físicas o concreto é composto por uma mistura de água, agregado miúdo, agregado graúdo e materiais cimentícios (ARAUJO *et al.*, 2000).

Os materiais empregados no concreto são abundantes em grande parte do território nacional e os equipamentos utilizados para executar o CCR são os mesmos da pavimentação tradicional em concreto asfáltico (BALBO, 2007).

A excelência da compactação é fundamental para a construção do CCR pois condiciona sua densidade, força e qualidade da superfície, o processo inicia-se imediatamente após a distribuição do material e continua até que o pavimento atenda

aos requisitos de densidade (GRAÇA *et al.*, 2016). Ainda, deve ser respeitado o período de cura para garantir as características almeçadas.

Conforme Ribeiro e Almeida (2000) estudos recentes comprovam que, respeitando a formulação correta e aplicando materiais de qualidade, o CCR apresenta comportamento similar, ou melhor, em relação ao concreto convencional, devida a alta energia aplicada durante a compactação. A Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre o CCR e o concreto convencional direcionado a pavimentação.

Tabela 1 - Diferença entre pavimento de concreto convencional e CCR.

	<b>Pavimento em Concreto</b>	<b>Pavimento em CCR</b>
<b>Proporção da mistura de materiais</b>	Agregados preenchem de 60 a 75% do volume da mistura. Relação água cimento entre 0,4 e 0,45. Pasta de cimento reveste completamente as partículas de agregado e preenche os vazios.	Agregados preenchem de 75 a 85% do volume da mistura. Possuem consistência mais seca devido ao maior teor de finos e menores teores de cimento e água.
<b>Trabalhabilidade</b>	Mistura é fluida.	A mistura tem consistência densa.
<b>Acabamento</b>	Mecanicamente texturizado.	Tipicamente apresenta textura similar ao asfalto, mas em alguns casos a textura pode assemelhar-se ao concreto convencional.
<b>Fratuza, transferência de carga e reforço</b>	A localização de fissuras é controlada pelo corte de juntas, e com a colocação de barras transversais para a transferência de carga e barras longitudinais que mantêm o intertravamento dos agregados.	CCR dificilmente apresenta juntas. A transferência de carga se dá pelo intertravamento entre as partículas. Por ser consolidado, não é possível a inserção de armaduras para reforço.

Fonte: HARRINGTON *et al.*, 2010.

Outras duas diferenças notáveis são:

- O consumo, enquanto o concreto convencional utiliza cerca de 320 kg/m<sup>3</sup>, o CCR consome menos de 65 %, em média 220 kg/m<sup>3</sup>.
- Para a execução do CCR não há exigências rigorosas quanto a qualidade do agregado graúdo, nem a granulometria do mesmo (DNIT, 2004).

Esta segunda característica apontada faz com que o CCR seja aplicado em casos de menor complexidade, utilizando materiais que seriam descartados caso fosse utilizada a tecnologia do concreto convencional (DNIT, 2004).

A aplicação do CCR pode trazer uma redução de custo de 20% a 50%, tal variação se justifica pela escolha do agregado e cimento, complexidade de colocação e volume de concreto utilizado. O mesmo autor destaca a redução em meses no tempo de construção, justificada pela possibilidade de construção contínua de materiais e aumento da produtividade do processo (USACE, 2010).

O CCR apresenta teores inferiores de cimento, água e agregados graúdos, porém há um maior volume no consumo do agregado miúdo, o qual preenche os vazios do pavimento e proporciona Intertravamento. Este garante a capacidade de absorção da carga do pavimento, sendo indicado para aplicação em pavimentos com demanda de tráfego de cargas pesadas e em baixa velocidade (HARRINGTON *et al.*, 2010). A Tabela 2 relaciona os benefícios e limitações da aplicação do CCR.

Tabela 2 - Benefícios e limitações da aplicação do CCR.

<b>Benefícios</b>	<b>Limitações</b>
Não necessita de formas, tirantes e reforço em aço;	Se não realizada a texturização com disco diamantado, o tráfego para altas velocidades torna-se indesejável devido a textura suave desse tipo de pavimento;
A menor quantidade de pasta resulta em menor retração do concreto, e conseqüentemente apresenta menos fissuras relacionadas à retração;	O volume de CCR que pode ser misturado em um caminhão em um determinado momento é menor que o concreto convencional devido a consistência seca da mistura;
Pode ser projetado para possuir alta resistência à flexão, à compressão e ao cisalhamento, de forma a suportar cargas repetitivas, pesadas e concentradas sem falhar;	Devido ao baixo teor de água nesse tipo de pavimento, em climas quentes é necessário maior atenção para minimizar a perda de umidade por evaporação;
Por possuir baixa permeabilidade, apresenta ótima durabilidade e resistência aos ataques químicos, mesmo em condições de gelo e degelo;	As bordas do pavimento são mais difíceis de compactar, por isso o grau de compactação exigido nesse pedaço é 2% menor que no meio, tornando-se uma área mais sensível, ainda que apresente bom desempenho;
Tempo e custo relacionados a manutenção de juntas podem ser eliminados;	Ao finalizar uma pista, a pista adjacente deve ser feita até uma hora após o início da primeira, para garantir ligação adequada entre elas;
A cor clara dos pavimentos de CCR requer menos equipamentos de iluminação.	Pela consistência seca, os requisitos de dosagem da mistura podem ser mais críticos que no concreto convencional.

Fonte: Harrington *et al.* (2010)

É inquestionável a presença de certos desafios para a aplicação da tecnologia do CCR, todavia este ainda se demonstra como uma solução para atender as

demandas de recuperação e expansão da malha rodoviária do Brasil, aliando economia com velocidade de produção (CNT, 2017).

## 2.4 ADIÇÕES MINERAIS

Adição mineral, de forma abrangente, refere-se a qualquer material além da água, agregados e cimento, que será adicionado à massa de concreto antes ou durante a mistura (MALHOTRA, 1996). Ainda segundo o autor, as adições não alteram as características do cimento, mas podem alterar a proporção da composição do concreto.

Os resíduos provenientes de indústrias que por muitas vezes são descartados em grandes volumes e em locais inapropriados, são considerados as adições minerais mais utilizadas na construção civil (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Malhotra e Mehta (1996) diversos resíduos ou subprodutos utilizados como adições aos cimentos e concretos contêm na composição substâncias tóxicas, patogênicas e poluentes, desta forma, podemos dizer que a adição mineral traz um benefício ecológico ao meio ambiente.

Fonseca (2010) menciona que as adições minerais promovem melhorias na durabilidade e resistência do concreto. Entre alguns dos benefícios estão: redução da porosidade capilar; diminuição das fissuras de origem térmica, melhoria na resistência a ataque por sulfatos, entre outros.

Dal Molin (2005) e Silva (2006) classificam as adições minerais, de acordo com suas características físico-químicas:

- Material Cimentante: Forma produtos cimentantes, porém sua auto-hidratação é lenta e insuficiente para aplicação do material para fins estruturais.
- Material Pozolânico: Possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar compostos com propriedades cimentantes.
- Material não reativo: É o caso do filler, material finamente dividido e sem atividade química, cuja atuação é basicamente um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para

a hidratação dos grãos de cimento aumentando a compacidade e refinando os poros.

Em princípio, qualquer cinza, de origem industrial ou vegetal, predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como adição mineral (JOHN *et al.*, 2003). De acordo com as características físicas e químicas da adição mineral haverá uma atuação diferente dentro da mistura de concreto (ALBUQUERQUE *et al.*, 2014).

Fonseca (2010, p.38) classifica a cinza da madeira como sendo pequenas partículas coletadas por sistema anti-pó das usinas termelétricas. Siddique (2012, p.28) define a cinza de madeira como resíduo gerado pela combustão da madeira e dos produtos da madeira (lasca, serragem, casca, etc).

Siddique (2012) observou a influência da cinza na absorção de água, resistência à compressão, à tração e à flexão, resistência ao congelamento e descongelamento, retração do concreto e seu comportamento à lixiviação. Devido a composição físico-química e mineralógica básica das cinzas de madeira, verificou que houve um aumento na capacidade de absorção de água do concreto com o aumento do teor de cinzas de madeira, porém a resistência do concreto diminui ligeiramente com o aumento do teor de cinzas de madeira, mas este tende a aumentar com a idade devido a ações pozolânicas, concluindo que as cinzas de madeira podem ser usadas como adição mineral para fins estruturais.

Dentre as propriedades no estado fluido, estudos evidenciam a diminuição da trabalhabilidade com o aumento do teor de cinzas de madeira na dosagem do concreto (UDOEYO *et al.*, 2006).

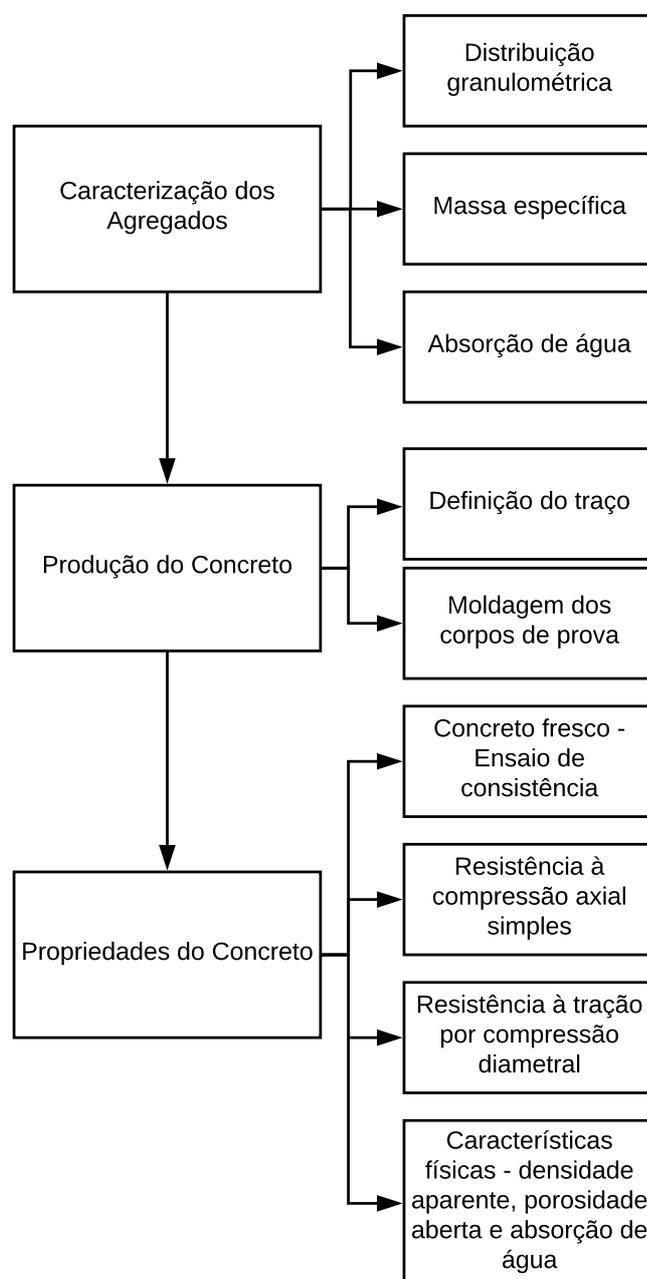
O uso de cinzas de madeira na dosagem do concreto, em percentagens dos 5% aos 30%, reduz o valor da resistência à compressão do concreto relativamente nos períodos de cura analisados (UDOEYO e DASHIBIL, 2002; ELINWA e EJEH, 2004; ELINWA e MAHMOOD, 2002; ABDULLAHI, 2006).

A tendência de redução da resistência à compressão se deve ao fato das partículas das cinzas de madeira atuarem essencialmente como material de enchimento, contribuindo para o empacotamento do material, pois como possui elevada finura, contribui preenchendo vazios e não como material ligante na matriz cimentícia (UDOEYO *et al.*, 2006).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais ensaiados e as metodologias utilizadas no desenvolvimento experimental do trabalho. A Figura 5 apresenta o fluxograma das etapas seguidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 5 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção do CCR em estudo foram água, cimento, agregados e cinza de madeira. A seleção dos materiais foi segundo critérios de disponibilidade na região do município de Joinville/SC e de características adequadas produção de concreto.

#### 3.1.1 Água

A água utilizada na preparação de todos os corpos de prova foi proveniente da rede pública de abastecimento de água de Joinville, Companhia Águas de Joinville (CAJ).

#### 3.1.2 Agregado miúdo

Segundo a Associação brasileira de normas técnicas (ABNT, 2005), agregado miúdo é aquele cujos grãos se encontram entre as peneiras de malha 4,75 mm até 150  $\mu$ m. Ainda de acordo com a norma, a areia utilizada deve garantir um mínimo de fino adequado para proporcionar um concreto trabalhável, que permita acabamento adequado.

O material foi adquirido de uma empresa da região de Joinville/SC. A Figura 6 apresenta uma pequena amostra da areia.

Figura 6 – Areia.



Fonte: Autor, 2018.

Para a caracterização do agregado miúdo foi realizada a curva de granulometria e determinadas as suas características físicas como, massa específica, absorção de água e módulo de finura.

### **3.1.3 Agregado Graúdo**

Segundo a ABNT (2015), o agregado graúdo é aquele que fica retido entre as peneiras de abertura de malha 75 mm e 4,75 mm, em ensaio normatizado, com peneira.

O agregado utilizado na mistura (Figura 7) é proveniente da Britagem Vogelsanger, pedreira localizada na região de Joinville/SC. A norma do DNIT 056 (2013) determina que para o CCR o diâmetro máximo do agregado deve ser 1/3 da espessura da camada de concreto ou 32 mm. Para a produção do CCR foi utilizada brita zero.

Figura 7 - Brita zero.



Fonte: Autor, 2018.

Para a caracterização do agregado graúdo foi realizado o ensaio de granulometria, e determinadas as suas propriedades físicas como massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado com superfície seca, absorção de água e módulo de finura.

### 3.1.4 Cimento

O cimento utilizado no estudo do CCR é classificado como CP V ARI, da linha de cimentos Votoran para obras especiais, sendo as características técnicas fornecidas pelo fabricante conforme composição apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição do Cimento Portland V ARI.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)		
		Clínquer + Gesso	Metal Carbonático	Norma Brasileira
Alta Resistência Inicial	CP V ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: ABCP, 2015.

Este cimento (Figura 8) possui a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação.

Figura 8 - Cimento Portland V ARI.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.1.5 Cinza de Madeira

A cinza de madeira (Figura 9) proveniente da combustão incompleta de biomassa (casca, galhos e subprodutos de Pinus), foi fornecida por uma indústria de painéis de madeira localizada em Araucária/PR.

Figura 9 - Cinza de madeira



Fonte: Autor, 2018.

A caracterização da cinza apresentada na Tabela 4 foi realizada por Bennack (2016), visto que o resíduo do estudo é procedente da mesma empresa.

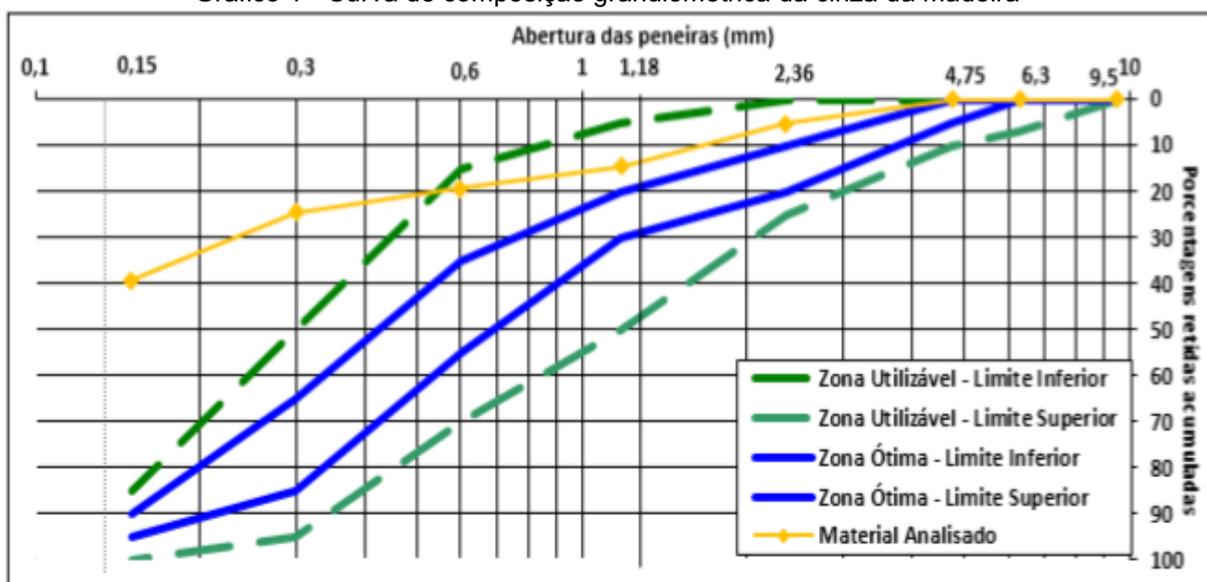
Tabela 4 - Características físicas da cinza de madeira.

Material	Diâmetro máximo	Módulo de finura	Massa específica	Absorção de água
Cinza de madeira	4,75mm	1,03	2,78 g/cm <sup>3</sup>	32,5%

Fonte: Bennack, 2016.

A curva granulométrica da cinza de madeira está apresentada no Gráfico 1, a mesma foi obtida por Bennack (2016) através do ensaio de granulometria seguindo a norma ABNT/NBR 248 (2003).

Gráfico 1 - Curva de composição granulométrica da cinza da madeira



## 3.2 MÉTODOS

Esta seção apresenta os procedimentos executados para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e a realização dos ensaios no CCR.

### 3.2.1 Distribuição granulométrica

Os ensaios de granulometria dos agregados foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC, campus Joinville, conforme

diretrizes da ABNT/NBR NM 248 (2003) e respeitando os limites da ABNR/NBR 7211 (2009) e ABNT/NBR 16312-2.

Para iniciar os ensaios, os agregados foram secos em estufa a aproximadamente 105 °C. Os materiais foram separados em duas amostras de 1.000 g de brita zero e duas amostras de 1.000 g de areia, sendo assim, cada material foi submetido a dois ensaios. O resultado final foi dado através da média dos ensaios.

As peneiras foram separadas, limpas e encaixadas por ordem de abertura de malha da base para o topo, seguindo as especificações da NBR 5734, as peneiras utilizadas foram: 9,50 mm; 6,30 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm; 0,15 mm; fundo e tampa.

O conjunto de peneiras foi posicionado no eixo central do agitador eletromagnético (Figura 10) e a porção de material colocada sobre a peneira superior. A tampa foi posicionada e o conjunto foi preso com os dispositivos de segurança. As peneiras foram agitadas mecanicamente por 10 minutos. Em seguida, destacou-se a peneira superior e foi encaixado o fundo, executou agitação manual por dois minutos. O material passante foi adicionado a peneira seguinte da pilha, este procedimento se repetiu para as demais peneiras. Cuidadosamente foi verificado o peso do material retido em cada peneira e a massa total do conjunto, que não deve diferir mais de 0,3 % da massa seca da amostra.

Figura 10 - Ensaio de granulometria.



Fonte: Autor, 2018,

### 3.2.2 Determinação da massa específica e absorção de água do agregado miúdo

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume. A determinação da massa específica do agregado miúdo foi executada de acordo com a ABNT/NBR 9776 (1987), utilizando balança de sensibilidade 0,01 g e frasco Chapman (Figura 11) com capacidade de 450 ml, composto por dois bulbos e um gargalo graduado.

Figura 11 - Frasco Chapman



Fonte: Autor, 2018.

Foram separadas duas amostras de 500g do agregado miúdo, de acordo com os critérios estabelecidos na NBR 7216 (1982). As amostras foram secas em estufa a aproximadamente 105 °C até constância da massa.

O frasco foi preenchido até 200 cm<sup>3</sup> com água e mantido em repouso para que não houvesse água nas paredes. Posteriormente foi introduzido cuidadosamente com o auxílio de um funil 500 g do agregado miúdo seco, o qual foi agitado para eliminação de bolhas de ar. O volume de água e agregado registrado (L).

Utilizando a Equação 1 foi obtida a massa específica do agregado miúdo.

$$(1) \quad \gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

$\gamma$  – massa específica do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ )

L – volume do frasco ocupado pelo conjunto água e agregado miúdo ( $\text{cm}^3$ )

A absorção é o processo pelo qual um líquido tende a ocupar os poros de um corpo sólido poroso. Para determinar a absorção de água do agregado miúdo foi reproduzido o método realizado por Bennack (2016). Foi utilizado um molde metálico com volume de  $318,09 \text{ cm}^3$  ( $V_{\text{agregado}}$ ) para condicionar o volume de agregado miúdo. O molde foi preenchido com o material em camadas, com o auxílio de um soquete pequeno. O frasco Chapman foi cuidadosamente preenchido com água até a marca de  $200 \text{ cm}^3$  ( $V_{\text{água}}$ ) e mantido em repouso por alguns minutos para que a não houvesse água na parede. Com o auxílio de um funil, a areia foi adicionada ao frasco. A mistura ficou em repouso por 72 horas para garantir total absorção das partículas, após esse período o volume final foi registrado ( $V_{\text{final}}$ ).

Para determinar a absorção de água, os volumes registrados foram aplicados nas Equações 2 e 3.

$$(2) \quad V_{\text{água,absorvida}} = (V_{\text{água}} + V_{\text{agregado}}) - V_{\text{final}}$$

Onde:

$V_{\text{água,absorvida}}$  - Volume de água absorvida ( $\text{cm}^3$ )

$V_{\text{água}}$  – Volume de água inicialmente adicionada no frasco ( $200 \text{ cm}^3$ )

$V_{\text{agregado}}$  - Volume de agregado miúdo ( $200 \text{ cm}^3$ )

$V_{\text{final}}$  - Volume final ( $\text{cm}^3$ )

$$(3) \quad A = \frac{V_{\text{água,absorvida}} \times 100}{(V_{\text{água}} + V_{\text{agregado}})}$$

Onde:

A – Absorção do agregado miúdo (%)

$V_{\text{água,absorvida}}$  - Volume de água absorvida ( $\text{cm}^3$ )

$V_{\text{água}}$  – Volume de água inicialmente adicionada no frasco ( $200 \text{ cm}^3$ )

$V_{\text{agregado}}$  - Volume de agregado miúdo ( $\text{cm}^3$ )

### 3.2.3 Determinação de massa específica e absorção de água do agregado graúdo

A determinação da massa específica e absorção de água seguiu as diretrizes da ABNT/NBR NM 53 (2009). Uma amostra de 2.000 g de brita zero foi separada e submersa em água a temperatura ambiente por 24 horas. Após este período, a amostra foi depositada em um cesto vazado e submersa em água, pesada com balança digital de precisão de 0,1 g, registrando-se a massa do agregado em água ( $m_a$ ). Posteriormente, a amostra foi superficialmente seca e teve a massa em gramas do agregado saturado com superfície seca ( $m_s$ ) registrada. Por fim, a amostra foi seca a 105 °C em estufa e pesada novamente. Obtendo-se a massa em gramas do agregado seco ( $m$ ).

A massa específica do agregado saturado com a superfície seca ( $m_{e,SSS}$ ) foi obtida com a substituição dos dados obtidos na Equação (4).

$$(4) \quad m_{e,SSS} = \frac{m_s}{m_s - m_a}$$

Onde:

$m_{e,SSS}$  – massa específica do agregado saturado com a superfície seca ( $\text{g/cm}^3$ );

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

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

A diferença ( $m_s - m_a$ ) é numericamente igual ao volume do agregado, excluindo-se os vazios permeáveis.

Para determinar a massa específica do agregado seco, foi utilizada a Equação (5).

$$(5) \quad m_{e,s} = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Onde:

$m_{e,s}$  – massa específica do agregado seco ( $\text{g/cm}^3$ );

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

$m_s$  – massa ao ar da amostra saturada com superfície seca (g);

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

Por fim, a Equação (6) foi utilizada para determinar a absorção de água do agregado graúdo.

$$(6) \quad A = \frac{m_s - m_a}{m} \times 100$$

Onde:

$A$  – absorção de água do agregado graúdo (%)

$m_s$  – massa ao ar da amostra saturada com superfície seca (g);

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

$m$  – massa ao ar da amostra seca (g)

### 3.2.4 Preparação do concreto e moldagem dos corpos de prova

A preparação do concreto e a moldagem dos corpos de prova foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina, no Campus de Joinville.

Para a dosagem do concreto foi utilizado o traço 1 : 9,45 : 9,45 (cimento, brita, areia) com 6,5% de umidade sobre a massa seca e consumo de cimento de 110 g/cm<sup>3</sup>. Foram preparadas três formulações, onde na Formulação 1 não houve adição de cinza, sendo está a Formulação Básica, e nas Formulações 2 e 3 houve substituição de 5% e 10% de areia por cinza, respectivamente.

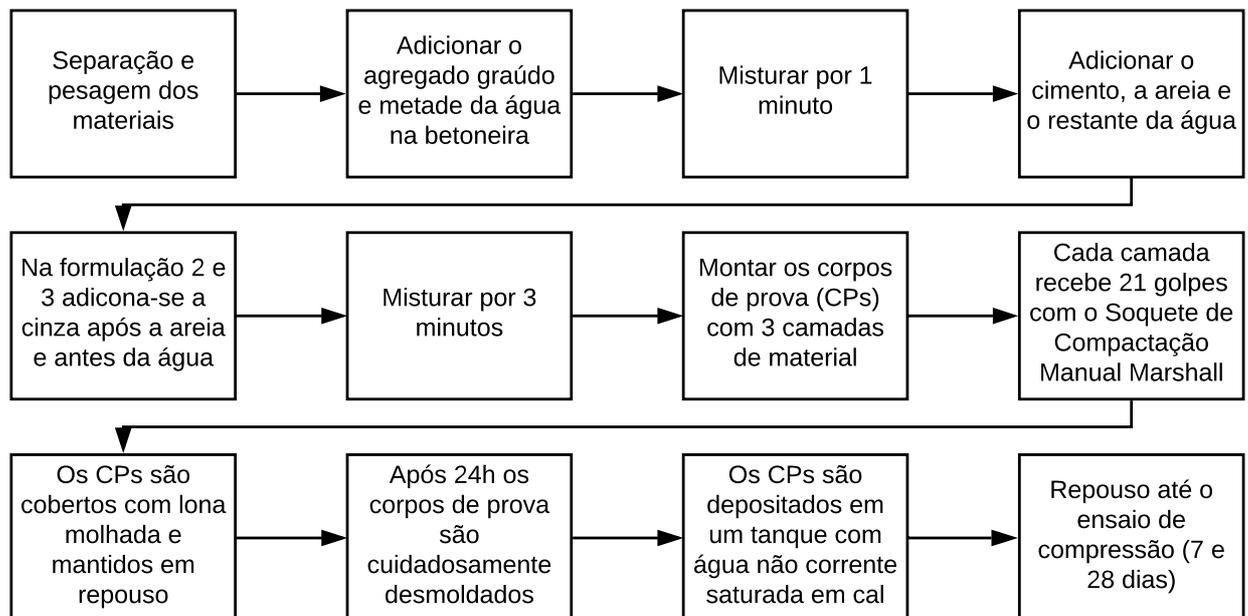
A cinza possui mais finos do que a areia, sendo assim, a substituição do material promove a necessidade de ajuste na quantidade de água para assegurar as mesmas características em todas as formulações. Como a cinza tem índice de absorção de 32,5%, houve a adição de água proporcional a esse consumo nas Formulações 2 e 3.

Os concretos foram preparados através de betoneira elétrica com capacidade de 140 litros. A moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações do DNIT/056 (2013), com exceção dos moldes metálicos, foi utilizado molde cilíndrico 10 x 20 cm ao invés do recomendado com 15 x 30 cm. Para compactação entre as

camadas foi utilizado o Soquete de Compactação Manual Marshall, que possui 4,56 kg e altura de queda de 45 cm.

Os CP foram desmoldados após 24 horas e mantidos em repouso em água não corrente saturada em Cal até o momento de cada ensaio. A Figura 11 apresenta o fluxograma das etapas para a execução dos corpos de prova.

Figura 12 - Fluxograma da execução dos corpos de prova.

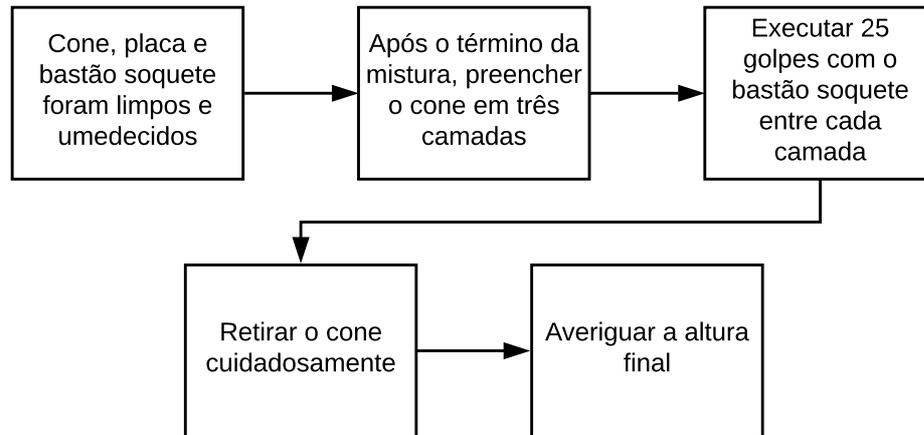


Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.5 Ensaio de Consistência – *Slump Test*

O ensaio de consistência de tronco de cone, conhecido como *Slump Test*, foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC, seguindo as especificações da ABNT/NBR NM 67 (1998). O ensaio foi realizado para as três formulações, o fluxograma na Figura 13 apresenta as etapas da execução do *Slump Test*.

Figura 13 - Fluxograma de execução do Slump Test.



Fonte: Autor, 2018.

O ensaio foi realizado dentro do intervalo de tempo limite de 150 segundos. Na Figura 14 encontram-se os equipamentos utilizados para a execução do mesmo.

Figura 14 - Equipamentos para *Slump Test*.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.6 Ensaio de Resistência a Compressão Simples

O ensaio de resistência a compressão axial foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade Anhanguera, Campus Joinville. O ensaio foi executado de acordo com a norma ABNT/NBR 5739 (2007). Foram rompidos 4 corpos de prova de cada formulação aos 7 e 28 dias.

A máquina de ensaio de compressão axial (Figura 15) deve ser equipada com dois pratos de aço, cujas superfícies de contato com o corpo-de-prova tenham sua menor dimensão 4% superior ao maior diâmetro do corpo de prova a ser ensaiado.

Figura 15 – Máquina de ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor, 2018.

Antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e o CP devem ser limpos e secos. Posterior ao início do ensaio o CP tem suas superfícies inferior e superior retificadas. O CP deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior e a grade de segurança deverá manter-se fechada durante o procedimento.

O carregamento do ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com velocidade constante durante todo o ensaio.

Quando o CP possuir a relação  $h/d$  (altura/diâmetro) menor que 1,94, multiplicar

a força máxima alcançada (F) pelo fator de correção correspondente especificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Fator de correção de acordo com a relação altura/diâmetro do corpo de prova

Relação h/d	2,00 até 1,94	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Fonte: NBR 5739 (2007).

A resistência a compressão simples foi determinada através da Equação 7.

$$(7) \quad f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Onde:

$f_c$  – resistência à compressão (MPa)

$F$  – força máxima alcançada (N)

$D$  – diâmetro do corpo de prova (mm)

### 3.2.7 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto foi aferida a partir das diretrizes da norma ABNT/NBR 7222 (2011). Foram realizados 4 testes para cada formulação e o resultado foi obtido a partir da média.

O corpo de prova deve ser disposto paralelamente sobre o eixo da máquina de compressão, de modo que este fique centralizado.

A carga aplicada deve ser contínua e sem choques, com acréscimo constante da tensão de tração com velocidade constante até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração por compressão diametral é calculada a partir da Equação 8.

$$(8) \quad f_{cd} = \frac{2F}{\pi dL}$$

Onde:

$f_{cd}$  – resistência à tração por compressão diametral (MPa)

$F$  – carga máxima obtida no ensaio (N)

$d$  – diâmetro do corpo de prova (mm)

$L$  – altura do corpo de prova (mm)

### 3.2.8 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

As propriedades físicas do concreto foram calculadas a partir dos princípios de Arquimedes. Os pedaços provenientes do rompimento dos CP com 28 dias foram coletados e mantidos em estufa a 103 °C por 24 horas. A massa seca em estufa foi aferida ( $m_s$ ). Após a aferição das massas, os pedaços foram imersos em água por 72 horas e a massa imersa em água ( $m_i$ ) foi registrada. Os pedaços foram secos superficialmente e pesados novamente, por fim a massa saturada com superfície seca ( $m_{SSS}$ ) foi registrada.

Posterior as medições, determinaram-se as propriedades físicas substituindo os dados anteriores nas Equações 9, 10 e 11.

$$(9) \quad A = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\%)$$

Onde:

A – Absorção de água (%)

$m_{SSS}$  – massa saturada com superfície seca (g)

$m_i$  – massa imersa (g)

$m_s$  – massa seca (g)

$$(10) \quad \rho = \frac{m_s}{m_{SSS} - m_i}$$

Onde:

$\rho$  – Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$m_{SSS}$  – massa saturada com superfície seca (g)

$m_i$  – massa imersa (g)

$m_s$  – massa seca (g)

$$(11) \quad \eta = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_{SSS} - m_i} \times 100 (\%)$$

Onde:

$\eta$  – Porosidade aberta (%)

$m_{SSS}$  – massa saturada com superfície seca (g)

$m_i$  – massa imersa (g)

$m_s$  – massa seca (g)

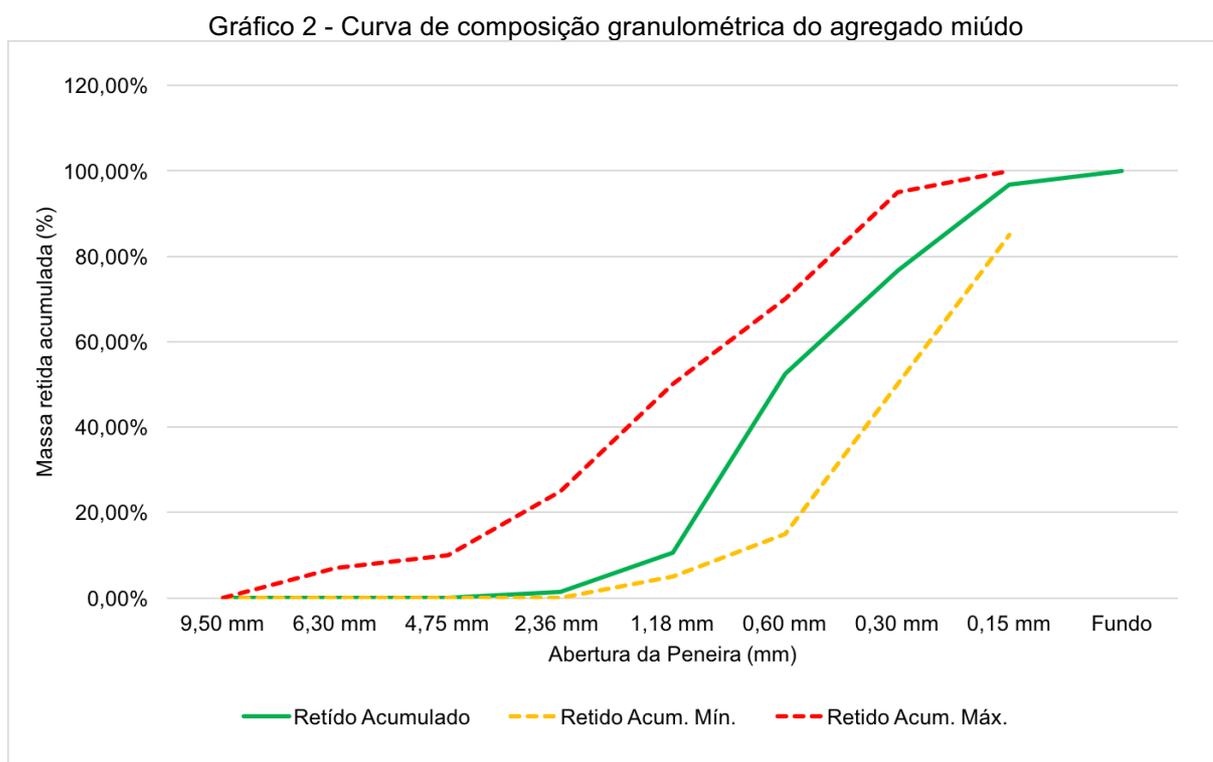
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios detalhados no Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS, bem como a discussão dos mesmos.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.1 Agregado Miúdo

O ensaio de caracterização granulométrica da areia natural foi realizado conforme a ABNT NM 248 (2013). A curva da distribuição granulométrica e os limites da zona utilizável superior e inferior estabelecidos na norma são apresentados no Gráfico 2.



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que o agregado possui uma alta concentração de finos em sua composição. Os finos aumentam a absorção de água da mistura que por consequência alteram a trabalhabilidade e também as propriedades físicas do

concreto endurecido. Entretanto, a composição granulométrica do agregado utilizado está dentro dos limites recomendados pela norma.

As demais características físicas do agregado miúdo analisadas no ensaio de granulometria, diâmetro máximo, módulo de finura, massa específica e absorção de água estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo

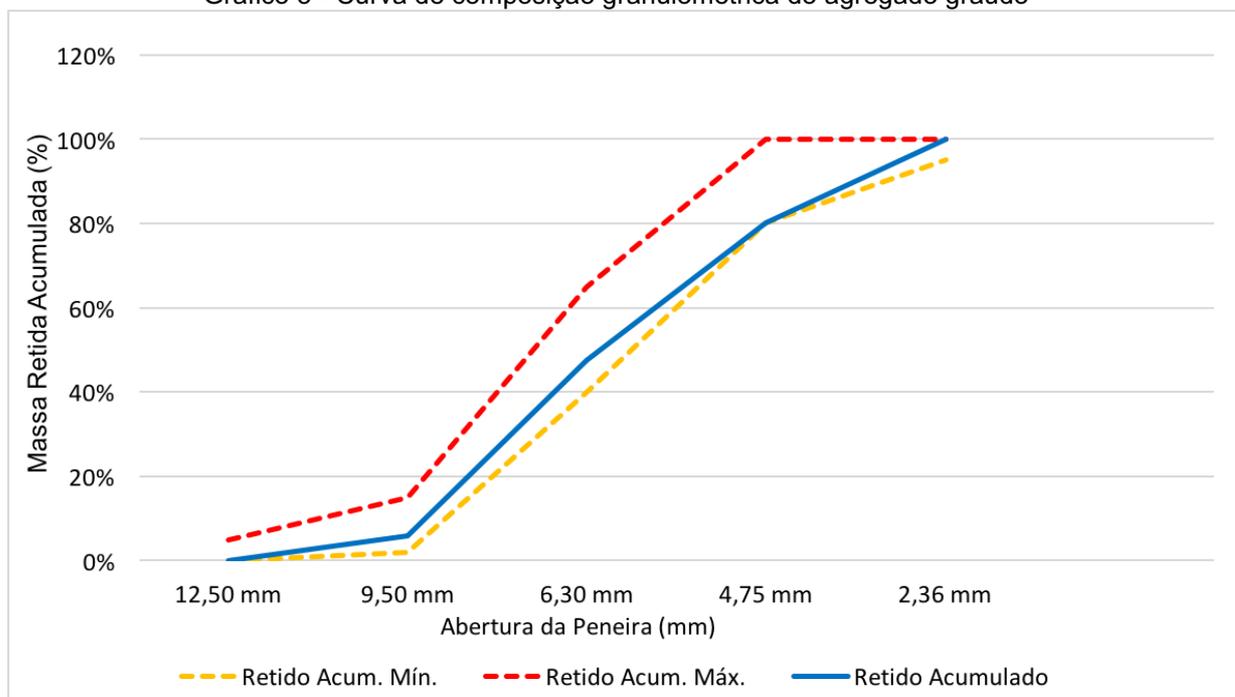
Material	Diâmetro máximo	Módulo de finura	Massa específica	Absorção de água
Agregado miúdo	2,36 mm	2,38	2,54 g/cm <sup>3</sup>	18,27%

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.2 Agregado Graúdo

O ensaio de caracterização granulométrica da brita zero foi realizado conforme a ABNT NM 248 (2013). A curva da distribuição granulométrica e os limites da zona utilizável superior e inferior estabelecidos na norma são apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Curva de composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor, 2018.

A composição granulométrica do agregado graúdo utilizado no ensaio está dentro dos limites admissíveis pela norma.

As demais características físicas do agregado graúdo analisadas no ensaio de granulometria, diâmetro máximo, módulo de finura, massa específica e absorção de água estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características físicas do agregado graúdo

Material	Diâmetro máximo	Módulo de finura	Massa específica do agregado seco	Massa específica do agregado saturado com superfície seca	Absorção de água
Agregado Graúdo	9,50 mm	2,33	2,71 g/cm <sup>3</sup>	2,74 g/cm <sup>3</sup>	1,97%

Fonte: Autor, 2018.

## 4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

### 4.2.1 Moldagem dos Corpos-de-Prova

Para a produção do concreto utilizado na moldagem dos corpos-de-prova foram consideradas as quantidades dos materiais especificados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dosagem dos materiais para o concreto

	Cimento	Areia média	Brita 0	Água	Cinza
	(gramas)				
<b>Formulação 1</b>	2.763,82	26.118,09	26.118,09	3.592,96	-
<b>Formulação 2</b>	2.763,82	24.812,19	26.118,09	3.592,96	1.305,90
<b>Formulação 3</b>	2.763,82	23.506,28	26.118,09	3.592,96	2.611,81

Fonte: Autor, 2018.

Com o intuito de mitigar a maior absorção de água pela cinza em comparação da areia, foi adicionado 57,49 g e 116,77 g de água nas Formulação 2 e 3, respectivamente.

#### 4.2.2 Ensaio de Consistência

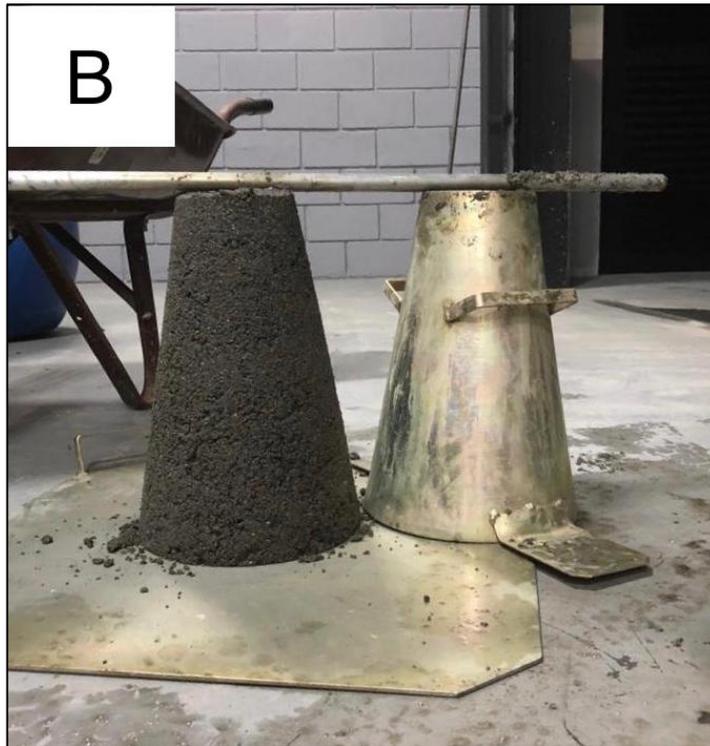
Como previsto na literatura por PCA (2010), não houve abatimento para todas as formulações preparadas e testadas pelo ensaio *Slump Test*. Essa característica garante que a mistura possui umidade ideal para a boa compactação, mantendo a consistência seca que suporte o peso do rolo vibratório sem perder a coesão dos materiais. Os resultados do ensaio para a Formulação 2 com 5% de cinza, e para Formulação 3 com 10% de cinza, estão apresentados nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Figura 16 - Resultado *Slump Test* (A).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 17 - Resultado *Slump Test* (B).

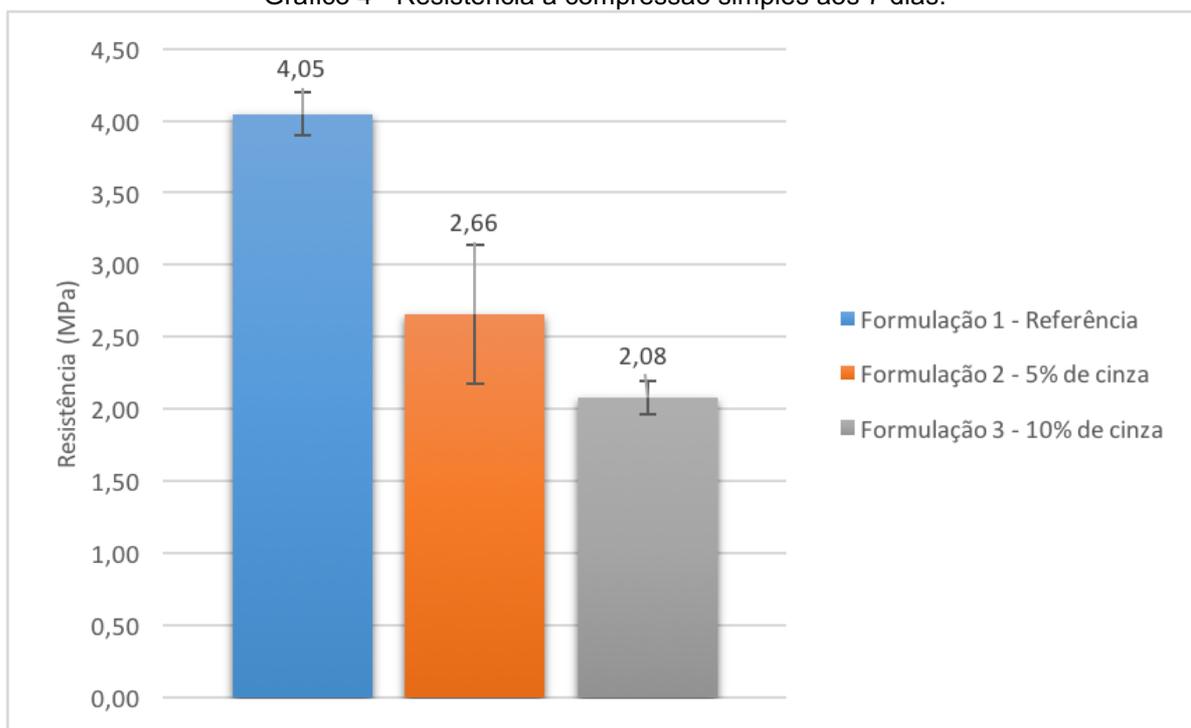


Fonte: Autor, 2018.

#### **4.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples**

O primeiro ensaio de resistência a compressão simples realizado aos 7 dias tem seus resultados apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência à compressão simples aos 7 dias.

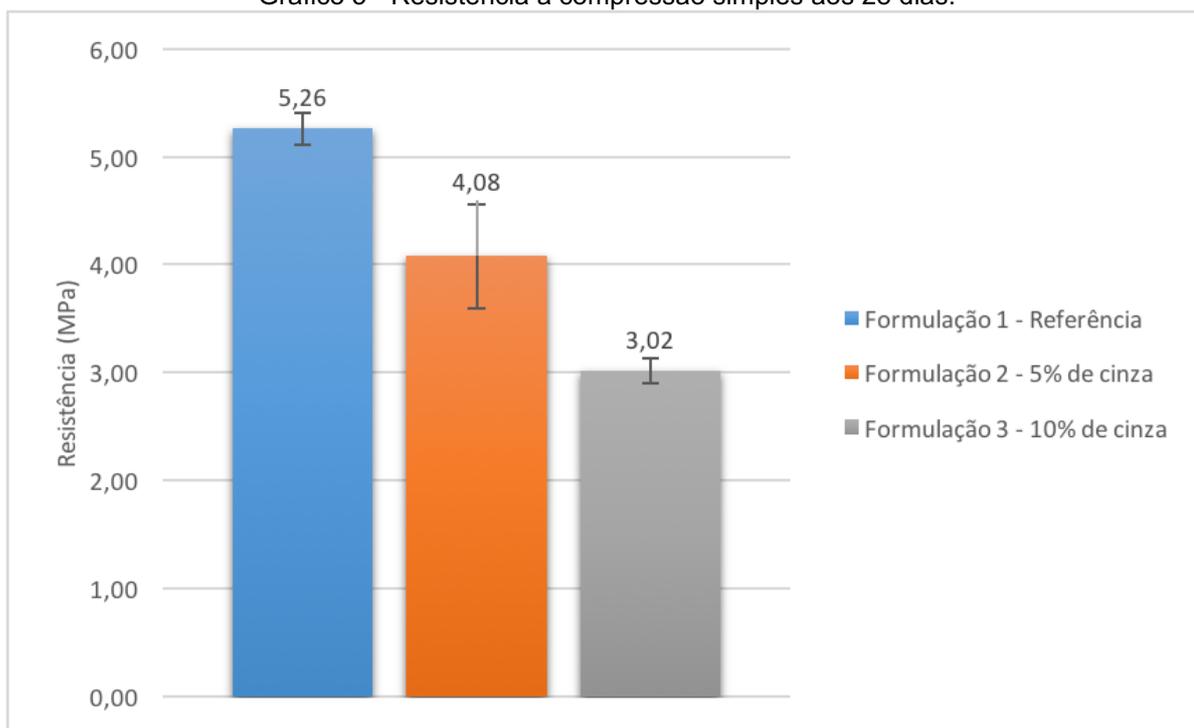


Fonte: Autor, 2018.

É possível observar que houve uma redução na resistência das Formulações de acordo com o aumento do teor de cinza na mistura. A resistência média atingida pela Formulação 1 foi de 4,05 MPa, na Formulação 2 houve uma redução de 34,32% e a Formulação 3 obteve uma redução na resistência de 48,64% quando comparado com a Formulação Referência.

O resultado do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias está apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Resistência à compressão simples aos 28 dias.



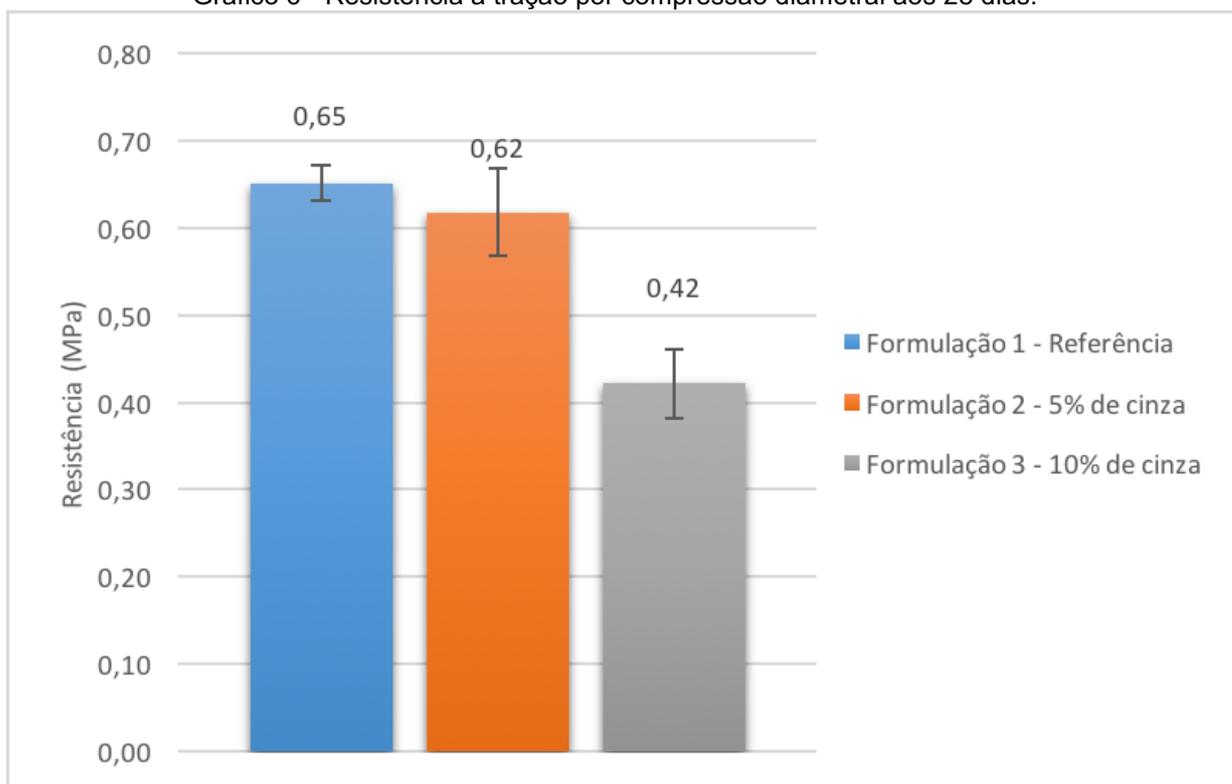
Fonte: Autor, 2018.

O comportamento de redução na resistência de acordo com o acréscimo do teor de cinza se manteve. A Formulação 1 apresentou resistência de 5,26 MPa, enquanto a resistência das Formulações 2 e 3 reduziram 22,43% e 42,58% respectivamente.

#### 4.2.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado aos 28 dias, os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico

Gráfico 6 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2018.

A resistência no ensaio de tração por compressão diametral reduziu com a substituição da cinza. A Formulação Referência atingiu resistência de 0,65 MPa, enquanto a Formulação 2 e 3 obtiveram 4,61 % e 35,38 % de redução na resistência média.

#### 4.2.4 Densidade Aparente, Porosidade Aberta e Absorção de Água

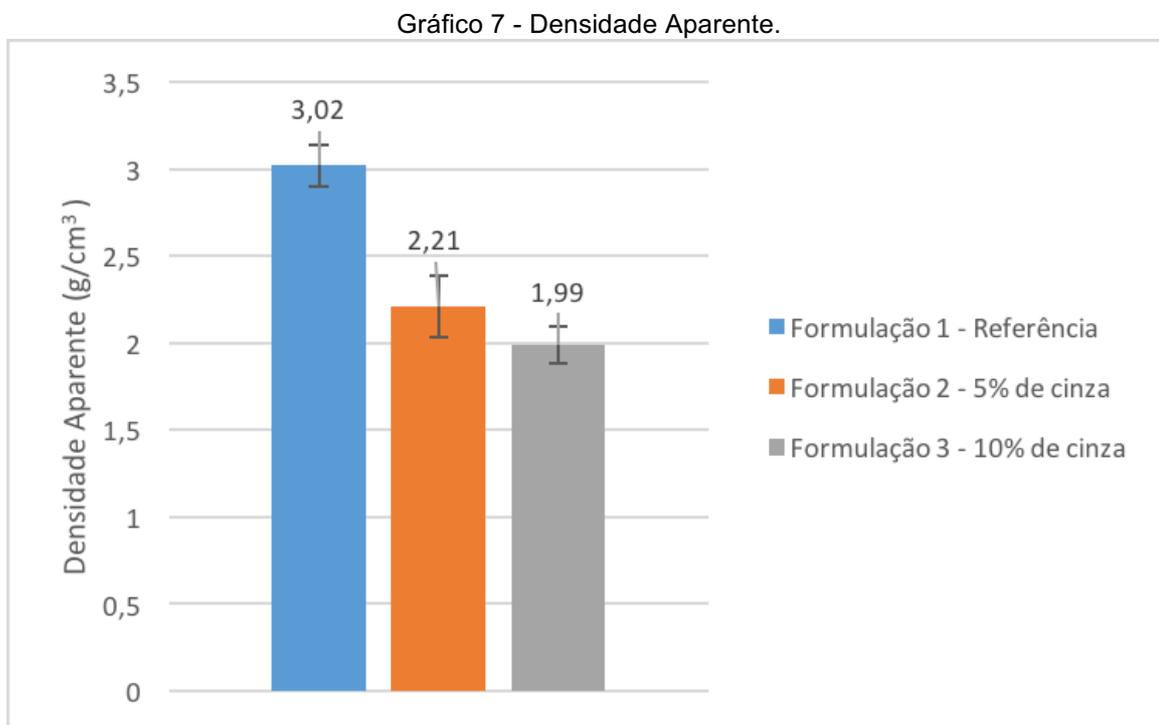
Após os ensaios de resistência, os CPs foram ensaiados quanto suas características físicas. Sendo os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físicas dos corpos de prova.

	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Porosidade aberta (%)
<b>Formulação 1</b>	3,02	7,97	24,14
<b>Formulação 2</b>	2,21	9,87%	31,58
<b>Formulação 3</b>	1,99	14,08%	41,58

Fonte: Autor, 2018.

O Gráfico 7 ilustra os valores de densidade aparente para cada Formulação, assim como seus respectivos desvios padrões.

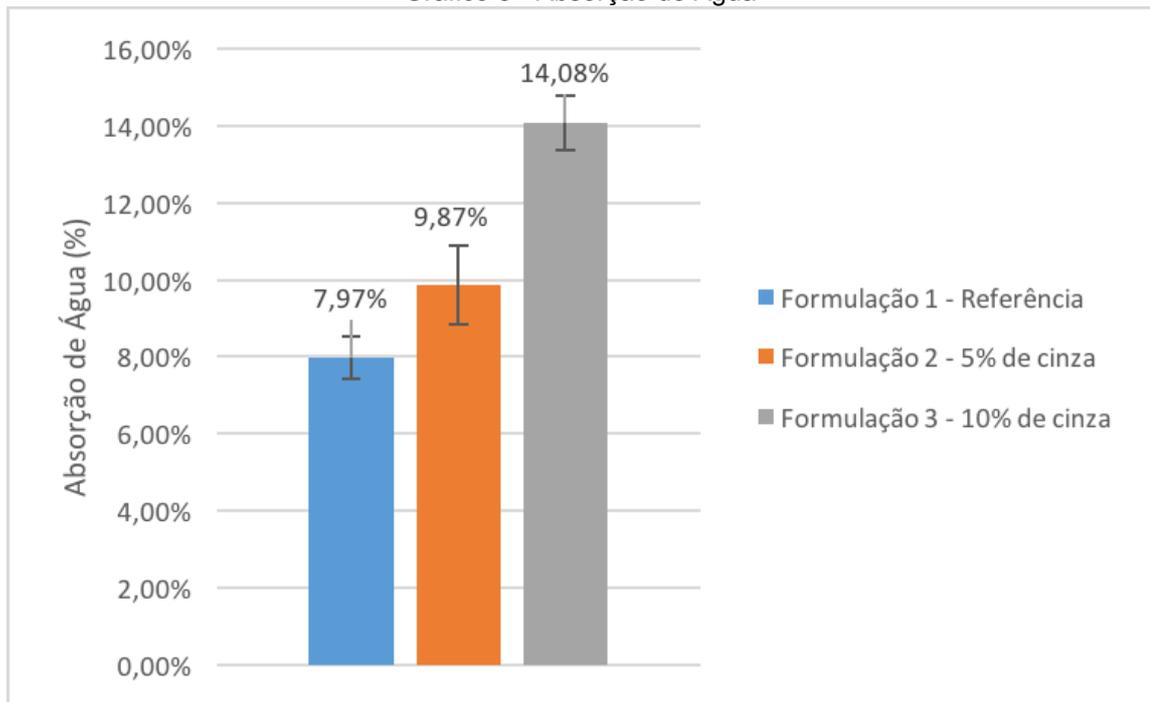


Fonte: Autor, 2018.

Analisando os resultados é possível observar que houve uma redução na densidade aparente do CCR com o acréscimo de cinza. Essa redução pode estar relacionada com a característica da cinza absorver mais água que o agregado miúdo, e posteriormente essa água evapora gerando regiões de vazios.

O Gráfico 8 apresenta a absorção de água das três formulações do CCR. A Formulação 2, com 5 % de cinza, apresentou uma absorção 19,25 % maior que a Formulação 1, enquanto a Formulação 3, com 10% de cinza, teve um crescimento de 34,39 % de absorção de água comparada com a Formulação 1.

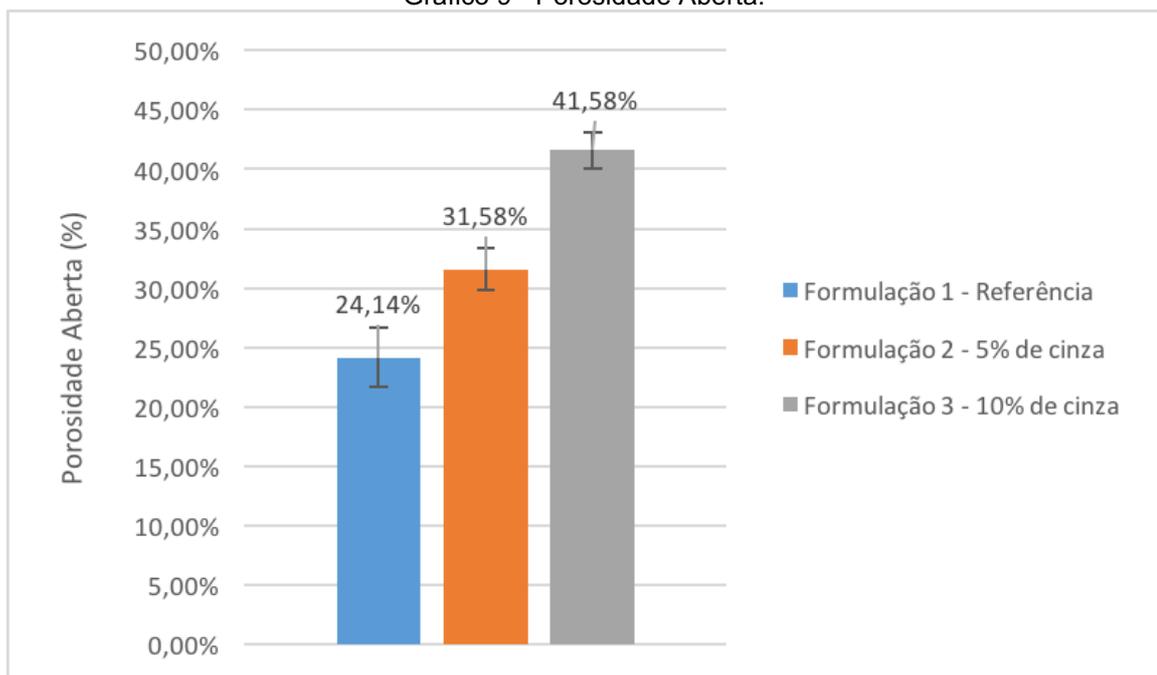
Gráfico 8 - Absorção de Água



Fonte: Autor, 2018.

O aumento da absorção de água pelos CPs de acordo com o acréscimo na quantidade de cinza pode estar relacionado à porosidade. O Gráfico 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta dos CPs.

Gráfico 9 - Porosidade Aberta.



Fonte: Autor, 2018.

A porosidade aberta na Formulação 1 foi de 24,14%, enquanto para as Formulações 2 e 3 o valor da porosidade aberta aumentou 33,05% e 41,94% respectivamente. A porosidade aberta é a relação entre o volume de vazios acessíveis a água e o volume aparente da amostra, sendo assim, o fato da cinza ter mais finos e conseqüentemente absorver mais água, atribuiu uma maior porosidade para as Formulações 2 e 3.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias e o ensaio de resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias, estabeleceram que existe uma redução na capacidade de resistência dos CPs quando há adição de cinza de madeira.

Por ter menor módulo de finura, a área superficial das partículas de cinza é maior que a do pó-de-pedra. Logo, a adição das cinzas faz com que a superfície de grãos a serem ligados seja maior para a mesma quantidade de cimento, em relação a FB. A dificuldade de ligação das partículas irá interferir diretamente na resistência mecânica adquirida, visto que, como afirma Harrington et al. (2010) a transferência de cargas desse tipo de concreto se dá por meio dessas ligações.

Segundo Udoeyo (2006), a trabalhabilidade do concreto é reduzida com a adição da cinza de madeira. Em percentagens dos 5% aos 30%, as cinzas reduzem também o valor da resistência à compressão do concreto nos períodos de cura analisados (UDOEYO e DASHIBIL, 2002; ELINWA e EJEH, 2004; ELINWA e MAHMOOD, 2002; ABDULLAHI, 2006). Estes efeitos de redução da resistência a compressão, estão associados ao fato das partículas da cinza da madeira representarem na mistura da massa do concreto um material essencialmente de enchimento e não como material ligante na matriz cimentícia (UDOEYO et al., 2006).

A maior porosidade aberta e absorção de água analisadas nos ensaios de caracterização física dos CPs podem estar relacionadas à compactação manual, pois não é possível garantir homogeneidade da força aplicada para todos os CPs, como concluiu Aghabaglou et al. (2013).

Outra característica que justifica o aumento da porosidade aberta e absorção de água do concreto é a maior absorção de água da cinza, que é de 32,5% enquanto da areia é de 18,27%.

Conclui-se que mesmo respeitando a maior absorção de água da cinza e fazendo as correções necessárias na quantidade de água de amassamento, houve uma redução considerável na resistência. Sendo assim, para utilizar o Concreto Compactado a Rolo com substituição parcial de agregado miúdo por cinza de madeira para sub-base de pavimento rígido é necessário verificar se a quantidade de água

corrigida foi suficiente, bem como a quantidade de cimento, ou ainda os percentuais da substituição.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de compressão aos 90 dias de vida do CCR;
- Realizar o mesmo estudo utilizando compactação mecânica para avaliação comparativa;
- Estudar as variações das propriedades do CCR com tratamento prévio das cinzas, como moagem, considerando diferentes módulos de finura;
- Estudar a influência das condições de queima nas propriedades das cinzas de madeira, considerando a possibilidade de melhores resultados quando da utilização dos resíduos;
- Variar o traço, utilizando mais material cimentante.

## REFERÊNCIAS

ABDULLAHI, M. 2006. **Characteristics of wood ash/OPC concrete**. Leonardo Electronic J. Pract. Technol., 8: 9-16.

AGHABAGLOU, A. M.; ÇAKIR, Ö. A.; RAMYAR, K. Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. **Journal Cement and Concrete Composites**. Vol. 37, p. 259-266, 2013.

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L. A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Águila**, Rio de Janeiro, RJ, n. 11, p. 57-66, 2014. Disponível em: <<http://ojs.uva.br/index.php?journal=revistaaquila&page=issue&op=view&path%5B%5D=7&path%5B%5D=showToc>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

ANDRIOLO, F. R. **Contribuições para o Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado**. Rio de Janeiro: BARBER GREENER. 1989.

ARAÚJO, K. K.; PIMENTEL, A. K. A problemática do descarte irregular dos resíduos sólidos urbanos nos bairros Vergel do Lago e Jatiúca em Maceió, Alagoas. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, SC, v. 4, n. 2, p. 626-668, 2015. Disponível em: <[http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/index](http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/index) >. Acesso em: 21 mar. 2018.

ARAÚJO, M. A.; SANTOS, M. J. P.; PINHEIRO, H. P.; CRUZ, Z. V. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 10, ano 1, p. 187-196, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em:

< <https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=767>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5734**: Peneiras para ensaios - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216**: Amostragem de agregados. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro - RJ: Moderna, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro - RJ: Moderna, 1998. 8 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro - RJ: Moderna, 2009. 8 p.

BENNACK, V. **Análise da Viabilidade Técnica da Reutilização da Cinza de Madeira em Produtos Cimentícios**. 2016. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC), Joinville, SC, 2016.

BALBO, JOSÉ TADEU. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**.

São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BORLINI M. C. et al. **Cinza da Lenha para Aplicação em Cerâmica Vermelha – Parte 1: Características da Cinza**. Scielo. São Paulo, v. 51, n. 319, jul./set. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v51n319/26791.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

BRAVO, E, 07/04/2000 **Cámara de Construcción** Disponível em: <<http://www.const ruccion.co.cr/revistas/agosto2/Art7.html>>. Acesso em: 18 out. 2018.

BAUER, L. A. FALCÃO. **Materiais de construção**. São Paulo: Livros Técnicos Científicos, 1995.

CARVALHO, MARCOS DUTRA DE. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1987.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017**. 403 p. Brasília, 2017.

DANIELESKI, MARIA L. **Proposta de metodologia para avaliação superficial de pavimentos urbanos: aplicação à rede viária de porto alegre**. 2004. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <[http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/maria\\_luiza\\_danieleski.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/maria_luiza_danieleski.pdf)> Acesso em: 17 nov. 2012.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssilica**. São Paulo, Tese de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. 286 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 056/2013-ES: **Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro - RJ: Diretoria

Executiva, 2013. 11 p.

DI PACE, G.; BECKER E, 05/04/2000. **Ventajas de los pavimentos de hormigom.** Disponível em: <<http://www.construyendo.com/notas/ventajas/index.htm>>. Acesso em: 18 out. 2018.

ELINWA, A.U. AND MAHMOOD, Y.A. 2002. **Ash from timber waste as cement replacement material.** Cem Concrete Composites; 24:219-22.

FEDRIGO, W.; ROSA, F. D.; NÚÑEZ, W. P. **Dosagem de Concreto Compactado com Rolo Visando sua Aplicação em Bases e Sub-bases de Pavimentos.** In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia. Goiânia: COBRAMSEG, 2014. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/anais-cobramsegsbmrgeojovem/>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Plataforma de Infraestrutura em Logística de Transportes - PILT / FDC - Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no brasil.** Disponível em: <[https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/centro-de-referencia-site/Materiais/PILT%20FDC\\_%20Diagn%C3%B3stico%20e%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20de%20ILT%20no%20Brasil.pdf](https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/centro-de-referencia-site/Materiais/PILT%20FDC_%20Diagn%C3%B3stico%20e%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20de%20ILT%20no%20Brasil.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2018.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica.** 2010. 105 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

GLUITZ, A. C; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza de madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, PR, 2013.

GRAÇA, N. G.; MENDES, H.S.; BITTENCOURT, RUBENS M.; BITTENCOURT, REYNALDO M.; BORGES, V. E. S.; CASCUDO, O. **Influência do Grau de**

**Compactação nas Propriedades do Concreto Compactado com Rolo.** São Paulo. 2016.

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: 04 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil: 2014 Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=1&idnoticia=2767&t=ibge-mapeia-infraestrutura-transportes-brasil&view=noticia>>. Acesso em: 18 out. 2018.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP-PCC/ANTAC, p.47-62.

LOTURCO, BRUNO. **Pavimento rígido.** Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo286026-1.aspx>> acesso em: 20 set. 2018.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARQUES FILHO, J. **Estado da arte de concreto compactado com rolo aplicado a barragens – uma perspectiva.** 2001. 128p. Seminário (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre – RS.

MESQUITA, José Carlos Lobato. **Pavimento rígido como alternativa econômica parapavimentação rodoviária – Estudo de caso: Rodovia BR-262, Miranda – Morro doAzeite–MS.** Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro UniversitárioUnivates, Lajeado, 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Construção Sustentável**: 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/item/8059>>. Acesso em: 18 out. 2018.

PEREIRA, L. A. G. **As políticas de planejamento e de desenvolvimento da infraestrutura de transporte rodoviário na mesorregião Norte de Minas Gerais**. In: VIII Encontro de Estudantes de História e I Encontro de Pós-Graduandos em História, 2011, Montes Claros. VIII Encontro de Estudantes de História e I Encontro de Pós-Graduandos em História. Montes Claros: UNIMONTES, 2011.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements**. 2010.

RIBEIRO, A. C. B.; ALMEIDA, I. R. Study on high performance roller compacted concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Dordrecht, v. 33, p. 398-402, 2000.

SENÇO, WLASTERMILER DE. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. vol. 2. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SIDDIQUE, R. Utilization of wood ash in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, p. 27-33, 2012.

SILVA, A. J. **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. 156 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2006.

TOFFOLO, R. V. M. **Pavimentos Sustentáveis**. 2015. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2015.

UDOEYO, F. F.; INYANG, H.; YOUNG, D. T.; OPARADU, E. E. **Potential of Wood**

**Waste Ash as an Additive in Concrete.** Journal of materials in civil engineering. Vol. 18, n. 4, p. 609-611, 2006.

UDOEYO, F.; DASHIBIL, P. **Sawdust Ash as Concrete Material.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2002.

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: 04 abr. 2018.