

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

Victoria Rocha Nunes Hoffmann

**DESEMPENHO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO COM ADIÇÃO DE
CINZA DE MADEIRA MOÍDA**

Joinville
2019

Victoria Rocha Nunes Hoffmann

**DESEMPENHO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO COM ADIÇÃO DE
CINZA DE MADEIRA MOÍDA**

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: Ma. Valéria Bennack

Joinville

2019

Victoria Rocha Nunes Hoffmann

**DESEMPENHO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO COM ADIÇÃO DE
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,SC, 28 de junho de 2019.

Banca Examinadora:

Prof^a. Ma. Valéria Bennack
Orientadora/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Gabriel Bononi
Rôgga Empreendimentos

Prof^a. Dra. Helena Samy Pereira
Católica de Santa Catarina

“[...] É bom ser instruído,
quando se dá ouvidos aos
conselhos de Deus” (2 Néfi 9:29).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me abençoado com a oportunidade de realizar uma graduação.

Ao meu esposo Mateus, pelo companheirismo e incentivo nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

Aos meus pais Maria Isabel e José Luís, pelo amor, incentivo e apoio incondicional que sempre me deram nos estudos.

A minha orientadora, professora Me. Valéria Bennack, pelo suporte, correções e amizade.

A esta universidade, por ter sido minha segunda casa nesta jornada.

A minha colega e amiga Gabriela Zonta, pela parceria e incentivo diário durante todo o desenvolvimento deste trabalho, especialmente nas madrugadas.

Aos bolsistas Vinicius Krause e Ruan Xavier, pelo auxílio e apoio nas etapas experimentais de laboratório.

A Perville, por ceder espaço e equipamentos para a realização de ensaios.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram neste trabalho e fizeram parte da minha formação.

RESUMO

O modal rodoviário corresponde a maior parcela do transporte brasileiro, porém 57% dos pavimentos apresenta algum tipo de deficiência. Dado este cenário, faz-se necessário o desenvolvimento de novos materiais e processos que melhorem a situação. Aliado a isso, a elevada quantidade de resíduos industriais que geram impactos negativos no meio ambiente, tem resultado em estudos de novos materiais para aplicações na construção civil que busquem a sustentabilidade no aproveitamento dos mesmos. Considerando este contexto, o uso de adições minerais em pavimentos apresenta grande potencial. Assim, o presente trabalho teve como objetivo a análise do comportamento do Concreto Compactado com Rolo com substituição do agregado miúdo pela adição de cinza de madeira moída nas proporções de 0% (referência), 7,5% e 15%. Para tal, primeiramente foi realizada a caracterização dos agregados e do resíduo através dos ensaios de massa específica, granulometria e absorção de água. Definida a dosagem, realizou-se a produção do CCR e, após 28 dias, os ensaios de resistência à compressão e algumas propriedades físicas. Os resultados obtidos indicaram aumento na resistência à compressão do CCR, apontando viabilidade técnica do uso do resíduo no CCR.

Palavras-chave: Adições. Cinza. Resíduos. CCR. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The road modal corresponds to the larger share of Brazilian transport, however 57% of the pavements present some type of deficiency. Given this scenario, it's necessary to develop new materials and processes that will improve the situation. Allied to this, the high amount of industrial residues that generate negative impacts on the environment, has resulted in studies of new materials for civil construction applications that seek sustainability in their use. Considering this context, the use of mineral additions in pavements presents great potential. Thus, the present study aimed at analyzing the behavior of Roller-Compacted Concrete replacing the fine aggregate by adding wood ash in the proportions of 0% (reference), 7.5% and 15%. In order to do so, in the first place the characterization of the aggregates and of the residue were made through particle size distribution, specific mass and water absorption tests. Then the dosage was defined, the RCC was produced and, after 28 days, the compressive strength and physical properties tests were made. The results indicated an increase in the compressive strength of the RCC, indicating technical feasibility of the use of the residue in the RCC.

Keywords: Additions. Ash. Waste. RCC. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas dos pavimentos flexíveis.....	23
Figura 2 - Seção típica de pavimentos rígidos.....	24
Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental da pesquisa.....	30
Figura 4 – Cimento CP V ARI	31
Figura 5 – Areia média	32
Figura 6 – Brita 0.....	33
Figura 7 – Cinza de madeira moída.....	33
Figura 8 – Moinho utilizado na moagem da cinza de madeira.....	35
Figura 9 – Jarro e esferas do moinho	35
Figura 10 – Jarros fixados dentro do moinho.....	36
Figura 11 – Agitador mecânico para granulometria.....	37
Figura 12 – Prensa hidráulica para rompimento dos corpos de prova	45
Figura 13 – Frasco vazio (a); Conjunto frasco mais agregado (b); Conjunto em banho à temperatura ambiente.	49
Figura 14 – Molde cilíndrico preenchido (a); Leitura final do ensaio (b).....	50
Figura 15 – Frações retidas nas peneiras: 9,5mm (a); 6,3mm (b); 4,75mm (c); 2,36mm (d); 1,18mm (e); 0,6mm (f); 0,3mm (g); 0,15mm (h); Fundo (i).	51
Figura 16 – Pesagem na condição saturada superfície seca (a); Pesagem na condição imersa (b); Pesagem após estufa (c).....	52
Figura 17 – Molde cilíndrico com resíduo (a); Leitura final do ensaio (b).....	55
Figura 18 – Mistura dos materiais em betoneira	56
Figura 19 – Slump test: Formulação de referência (a); Formulação com 7,5% de cinza (b); Formulação com 15% de cinza (c)	57
Figura 20 – Compactação do CCR nos corpos de prova (a); Corpo de prova recém-concluído (b); Desmoldagem após 24h (c)	57
Figura 21 – Imersão dos corpos de prova (a); Corpos de prova após 28 dias de cura (b)	58
Figura 22 – Identificação e separação dos fragmentos (a); Pesagem de fragmento (b).....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais diferenças entre pavimentos de concreto convencional e CCR	25
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do cimento.....	31
Tabela 2 – Massa específica da cinza de madeira	34
Tabela 3 – Módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado miúdo	48
Tabela 4 – Massa específica do agregado miúdo	49
Tabela 5 – Absorção de água do agregado miúdo	50
Tabela 7 – Massa específica do agregado graúdo	52
Tabela 8 – Absorção de água do agregado graúdo	53
Tabela 9 – Módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado graúdo	54
Tabela 10 – Absorção de água do resíduo tratado.....	55
Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova	56
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do CCR aos 28 dias	58
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados da Pesquisa CNT 2018.	19
Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado miúdo	47
Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado graúdo	51
Gráfico 4 – Curva granulométrica do resíduo tratado	53
Gráfico 5 – Resistência à compressão média aos 28 dias.....	59
Gráfico 6 – Porosidade aberta dos fragmentos analisados	61
Gráfico 7 – Absorção de água dos fragmentos analisados	61
Gráfico 8 – Densidade aparente dos fragmentos analisados	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR - California Bearing Ratio

CCR – Concreto compactado com rolo

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpos de prova

CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MF – Módulo de finura

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NBR – Norma Brasileira

PIB – Produto Interno Bruto

PR – Paraná

SC – Santa Catarina

SNV – Sistema Nacional de Viação

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

CaO – Óxido de Cálcio

SiO_2 – Dióxido de Silício

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro

K_2O – Óxido de Potássio

MgO – Óxido de Magnésio

SO_3 – Óxido Sulfúrico

TiO_2 – Dióxido de Titânio

P_2O_5 – Pentóxido de Fósforo

m – Metro

mm – Milímetro

ml – Mililitro

cm – Centímetro

cm² - Centímetro quadrado

km – Quilômetro

L – Litro

m³ - Metro cúbico

cm³ - Centímetro cúbico

g – Grama

g/cm³ - Gramas por centímetro cúbico

kg – Quilograma

kgf – Quilograma-força

h - Hora

π – Pi

D – Diâmetro

MPa – Megapascal

°C – Graus Celsius

% – Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 METODOLOGIA.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 O MODAL RODOVIÁRIO NO BRASIL	18
2.2 CENÁRIO ATUAL DOS PAVIMENTOS BRASILEIROS	18
2.3 CAMADAS DE UM PAVIMENTO.....	20
2.3.1 Revestimento	20
2.3.2 Base	21
2.3.3 Sub-base	21
2.3.4 Reforço do subleito	21
2.3.5 Camada de regularização	21
2.3.6 Leito	22
2.3.7 Subleito	22
2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS	22
2.4.1 Pavimentos flexíveis	22
2.4.2 Pavimentos rígidos	23
2.5 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO.....	25
2.6 ADIÇÕES MINERAIS	27
2.6.1 Cinza de madeira	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 MATERIAIS	30
3.1.1 Água	31
3.1.2 Cimento	31
3.1.3 Agregado Miúdo	32
3.1.4 Agregado Graúdo	32
3.1.5 Resíduo	33
3.2 MÉTODOS.....	34
3.2.1 Tratamento do resíduo	34
3.2.2 Caracterização física do agregado miúdo	36

3.2.2.1 Granulometria do agregado miúdo	36
3.2.2.2 Massa específica do agregado miúdo	37
3.2.2.3 Absorção de água do agregado miúdo.....	39
3.2.3 Caracterização física do agregado graúdo	40
3.2.3.1 Granulometria do agregado graúdo	40
3.2.3.2 Massa específica do agregado graúdo	40
3.2.3.3 Absorção de água do agregado graúdo.....	42
3.2.4 Caracterização física do resíduo	42
3.2.4.1 Granulometria do resíduo	42
3.2.4.2 Absorção de água do resíduo.....	42
3.2.5 Produção do CCR.....	43
3.2.5.1 Dosagem	43
3.2.5.2 Execução dos corpos de prova.....	44
3.2.6 Determinação das propriedades do CCR.....	45
3.2.6.1 Ensaio de resistência à compressão axial simples	45
3.2.6.2 Determinação da densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	47
4.1.1 Granulometria do agregado miúdo	47
4.1.2 Massa específica do agregado miúdo.....	48
4.1.3 Absorção de água do agregado miúdo.....	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	50
4.2.1 Granulometria do agregado graúdo	50
4.2.2 Massa específica do agregado graúdo.....	52
4.2.3 Absorção de água do agregado graúdo	53
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	53
4.3.1 Granulometria do resíduo	53
4.3.2 Absorção de água do resíduo.....	54
4.4 PRODUÇÃO DO CCR	55
4.4.1 Dosagem.....	55
4.4.2 Execução dos corpos de prova.....	56
4.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CCR.....	58
4.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial	58
4.5.2 Ensaio de densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta	59

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Discussões sobre o futuro do planeta vêm surgindo nas últimas décadas, trazendo importantes mudanças na sociedade atual. Ameaças como o aquecimento global e a escassez de recursos naturais trouxeram necessidade de inovações e resultaram na mobilização em defesa de atitudes e tecnologias mais sustentáveis. Em consequência disso, desenvolveu-se uma maior consciência relacionada aos problemas ambientais, com o objetivo de trazer materiais e processos construtivos que não causem danos à população e ao meio ambiente (CHERIAF e ROCHA, 2003).

Segundo o Conselho Internacional da Construção – CIB, o setor da construção civil é mundialmente reconhecido como o setor de atividades humanas que mais utiliza energia e consome recursos naturais, além de gerar mais de 50% dos resíduos sólidos, causando impactos ambientais significativos (MMA, 2019).

Dado este cenário, é evidente a necessidade de novas pesquisas que tragam soluções para a problemática da sustentabilidade e gestão de resíduos na construção civil.

Nesse quesito, uma das indústrias mais defasadas no Brasil é o setor de pavimentação. O modal rodoviário obteve grande incentivo de caráter político-econômico ao longo das últimas décadas, portanto, as rodovias ocupam atualmente uma considerável parcela do transporte nacional. A pesquisa anual de 2018 da Confederação Nacional do Transporte – CNT afirma que 60% do transporte de cargas e 90% do transporte de passageiros são realizados pelo modal rodoviário. Entretanto, a pesquisa concluiu que 57% do total de rodovias analisadas possui algum tipo de deficiência, delineando ainda mais a necessidade de inovação no setor.

De acordo com a literatura, os pavimentos podem ser classificados basicamente como rígidos ou flexíveis. Entre os pavimentos rígidos, destaca-se o Concreto compactado com rolo (CCR) por apresentar menor consumo de cimento e dispensar o uso do petróleo, trazendo maior economia dos recursos naturais. Os materiais constituintes deste tipo de pavimento são: água, agregado miúdo, agregado graúdo e cimento; em dosagem distinta do concreto convencional. Além disso, a fim de melhorar as propriedades do CCR pode-se fazer uso de adições minerais em sua composição.

Conforme Malhotra e Mehta (1996), o uso de adições minerais na indústria do concreto tem crescido consideravelmente nos últimos 50 anos e o potencial para futuros usos é ainda maior. O aproveitamento de resíduos da construção civil está ligado ao fato de sua composição ser

predominantemente de silicatos, aluminatos e óxidos alcalinos, mesma composição química básica dos materiais de construção usuais (CHERIAF e ROCHA, 2003).

Um dos resíduos que apresenta potencial para uso como adição mineral em concretos é a cinza de madeira, que é gerada por diversos setores e muitas vezes destinada a aterros. A cinza é obtida através da queima incompleta da madeira quando utilizada para geração de energia e foi utilizada como substituto parcial do agregado miúdo na composição do CCR, visando à valorização e o aproveitamento do resíduo.

1.1 OBJETIVOS

Para solucionar a problemática da falta de tecnologia e materiais sustentáveis para pavimentação, assim como uma destinação proveitosa do resíduo da cinza de madeira, os seguintes objetivos foram estabelecidos.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo estudar sobre como a adição de cinza de madeira moída influi na resistência a compressão do Concreto compactado com rolo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Alterar o módulo de finura do resíduo através da moagem
- Realizar a caracterização física dos agregados e da cinza de madeira moída.
- Definir o traço e a dosagem para a mistura do CCR
- Executar os corpos de prova de CCR com substituição parcial da areia pela cinza de madeira moída
- Atingir “*slump zero*” no ensaio de consistência do CCR através do *Slump Test*
- Avaliar o desempenho do CCR quanto a compressão axial aos 28 dias de cura dos corpos de prova
- Investigar a influência da absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente dos corpos de prova nos resultados da resistência.

1.2 METODOLOGIA

O método adotado foi a pesquisa experimental que “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2007).

Este trabalho teve como foco a realização de corpos de prova de CCR com substituição de 0% (referência), 7,5% e 15% de agregado miúdo por cinza de madeira moída. Após a confecção desses corpos de prova, foram avaliadas as características físicas e mecânicas através de ensaios laboratoriais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O MODAL RODOVIÁRIO NO BRASIL

Atualmente, o transporte rodoviário representa a maior parte do transporte terrestre no Brasil, atingindo praticamente todo o território nacional e sendo o mais expressivo no transporte de cargas (NOVAES *et al.*, 2001).

A Confederação Nacional do Transporte - CNT concluiu que 61% do transporte de cargas e 96% dos deslocamentos de passageiros do Brasil são realizados por meio de rodovias (CNT, 2018). Segundo dados do IBGE, o modal rodoviário foi responsável por 55,2% do PIB do setor de transporte em 2014. Tal porcentagem, demonstra a importância desse modal na geração de riquezas, emprego e na economia do país. (PAS, 2014).

2.2 CENÁRIO ATUAL DOS PAVIMENTOS BRASILEIROS

Hoje, o Brasil ocupa a 112ª posição (em uma comparação com 140 países) no quesito qualidade da infraestrutura rodoviária (CNT, 2018). Segundo dados da CNT através do Sistema Nacional de Viação – SNV (2017) o país conta com uma malha rodoviária de 1.720.700km e destes apenas 213.453km são rodovias pavimentadas (um número correspondente a apenas 12,4%). Essa distribuição desbalanceada e precária em que o país se encontra gera muitos impactos, tais como segurança e desconforto dos passageiros, desgaste dos veículos, velocidades desenvolvidas e tempo de viagem (CNT, 2018).

Em 2018, a CNT realizou uma pesquisa de rodovias e analisou 107.161km (aproximadamente 50,2%) das rodovias pavimentadas brasileiras e, concluiu que 57% dessas apresentam algum tipo de problema no estado geral. O estudo também avaliou as condições do pavimento, da sinalização e da geometria da via conforme exibido no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Resultados da Pesquisa CNT 2018.



Fonte: CNT (2018).

Para um país que contou com tanto investimento federal em infraestrutura de transporte, o panorama atual deveria ser contrário (CNT, 2016). Deficiente e insatisfatória, a malha rodoviária atual sofre as consequências da falta de manutenção preventiva (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Contudo, o principal motivo pelo qual as rodovias apresentam tantos problemas é que os métodos de dimensionamento e execução das mesmas são imprecisos (pois inicialmente não foram idealizados para o Brasil) e já estão defasados há mais de 40 anos em comparação com países como EUA, Japão e França (CNT, 2017).

Segundo Balbo (2007), dimensionar um pavimento consiste em determinar as espessuras de camadas da estrutura, levando em consideração que a mesma deve suportar um volume de tráfego preestabelecido, assim como as condições climáticas locais, oferecendo desempenho desejável. Ainda segundo Balbo (2007), para realizar este dimensionamento corretamente é imprescindível conhecer bem as propriedades dos materiais, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, quando expostos à repetição de carga e à climas extremos.

Para cumprir com esse objetivo foram concebidos diversos métodos de dimensionamento, aos quais deram aos engenheiros um instrumento de cálculo para que pudessem ser aplicados nas diversas situações de projeto (BERNUCCI, *et al.*, 2006).

Tais métodos, foram criados visando duas abordagens distintas: baseados na experiência em campo (método empírico) ou a partir da calibração de modelos teóricos com dados de campo e laboratório combinados (método empírico-mecanicista) (BERNUCCI, *et al.*, 2006).

Os métodos empíricos originam-se de experiências e verificações em campo e consistem em fórmulas, constantes e coeficientes (SENÇO, 1997). Por outro lado, o método empírico-

mecanicista (também encontrado em algumas referências como modelo mecanístico-empírico) é fruto da calibração de modelos teóricos combinando dados experimentais obtidos em campo e em laboratório (BALBO, 2007).

2.3 CAMADAS DE UM PAVIMENTO

Os pavimentos são estruturas compostas por várias camadas construídas sobre a superfície final de terraplenagem, designada a resistir os esforços do tráfego e efeitos do clima, propiciando conforto, economia, segurança e melhoria nas condições de rolamento aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2006).

São tradicionalmente classificados em três tipos fundamentais: rígidos e flexíveis (MEDINA e MOTTA, 2005). Contudo, atualmente também se tem usado os termos “pavimentos de concreto de cimento Portland” e “pavimentos asfálticos”, respectivamente, para apontar o tipo de revestimento utilizado nos pavimentos (BALBO, 2007).

Para garantir a segurança, um pavimento deve prover um deslocamento suave (sem causar desgaste excessivo dos pneus e altos níveis de ruídos), resistir às mudanças climáticas e apresentar boa drenagem das águas pluviais, assegurando um tráfego livre de derrapagens. (CNT, 2018)

Para atingir tais objetivos, é necessário realizar a distribuição das cargas, de maneira que o pavimento possa resistir às tensões impostas sem grandes deformações, prolongando sua vida útil (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Por este motivo, os pavimentos são compostos de camadas, que promovem a proteção do subleito e minimizam os esforços a ele impostos (DNIT, 2006). Obrigatoriamente, os pavimentos devem apresentar as camadas de revestimento e base, porém quando requeridos em projeto, podem haver camadas suplementares, são elas: sub-base, reforço do subleito, camada de regularização (CNT, 2018).

A seguir estão descritas as funções de cada camada que compõe um pavimento.

2.3.1 Revestimento

A camada de revestimento é a única camada visível ao usuário da via, que deve ser impermeável a fim de evitar que a penetração da água da chuva alcance as demais camadas e

prejudique o desempenho final da estrutura (CNT, 2018). Segundo Medina e Motta (2005), essa camada também se destina a melhorar as condições de rolamento no que diz respeito à comodidade e à segurança.

2.3.2 Base

Segundo Medina e Motta (2005), a base é camada na qual se constrói um revestimento, tendo como principal objetivo resistir e redistribuir os esforços verticais sobrevividos dos veículos às demais camadas.

2.3.3 Sub-base

Pode funcionar tanto como complementar à base como quanto como uma “corretiva do subleito” (MEDINA e MOTTA, 2005). Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), a sub-base possui as mesmas funções que a base e deve ser executada sobre o subleito ou reforço do subleito, desde que o mesmo esteja devidamente compactado e regularizado.

2.3.4 Reforço do subleito

Quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte é necessário reduzir espessuras elevadas na camada de sub-base, por esse motivo o reforço do subleito é executado geralmente sobre o subleito regularizado (CNT, 2018). Também é chamada de camada final de terraplenagem (MEDINA e MOTTA, 2005).

2.3.5 Camada de regularização

Segundo o DNIT (2006), esta camada é posta sobre o leito para conformá-lo de acordo com as especificações e possui espessura variável. Tem como objetivo corrigir eventuais falhas na

camada final de terraplenagem ou eventualmente também, de um leito antigo de estrada de terra (CNT, 2018).

2.3.6 Leito

O leito é a camada de transição entre o terreno de fundação e o corpo do pavimento (CNT, 2018). Ou seja, é a superfície final obtida pela terraplenagem e conformada ao seu greide e perfis transversais (DNIT, 2006).

2.3.7 Subleito

É o terreno natural, ou seja, o terreno de fundação do pavimento (DNIT, 2006). Não é considerado uma camada (CNT, 2018).

2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS

2.4.1 Pavimentos flexíveis

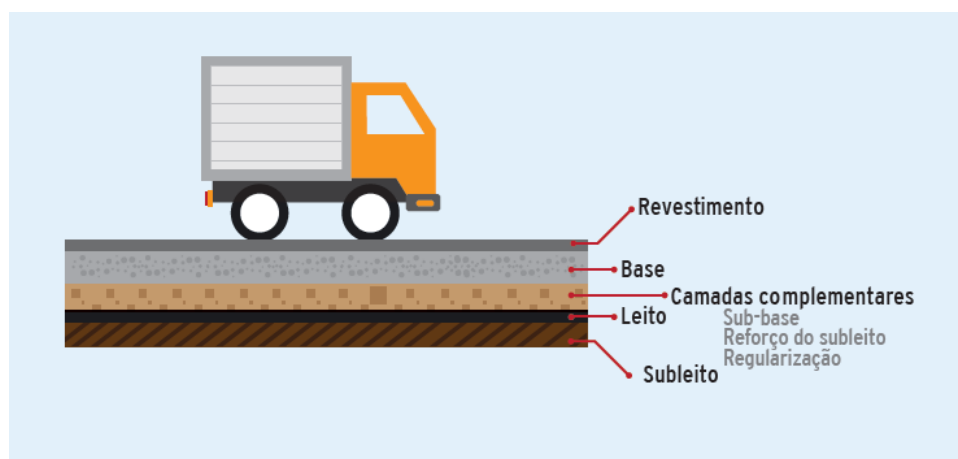
Nestes pavimentos, todas as camadas sofrem uma significativa deformação elástica ao receber a carga, sendo é distribuída teoricamente em parcelas equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006). Os pavimentos flexíveis possuem um revestimento que é composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis nacional vigente mais conhecido e até hoje amplamente utilizado, foi desenvolvido na década de 60 e atualizado na década de 80, pelo Engenheiro Murilo Souza, do extinto DNER. Por isso, é conhecido como Método do DNER e se fundamenta no uso de ábacos para a determinação das espessuras de cada camada. Sua abordagem se enquadra no modelo empírico, utilizando principalmente o Índice de Suporte California (ou CBR - California Bearing Ratio) como medida básica para a determinação da capacidade de suporte do subleito e dos demais materiais (DNIT, 2006). Entretanto, o modelo de ruptura assim como as condições de deformabilidade do ensaio não correspondem com o estado de tensões atuantes no pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2006). Assim sendo, é notável a necessidade de novas pesquisas e

investimentos na área, adaptando de forma mais realista os métodos ao país e trazendo novas soluções para a pavimentação brasileira.

As quatro camadas principais desse tipo de pavimento são: Revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2006). Já a CNT (2018) afirma que um pavimento flexível obrigatoriamente deve apresentar revestimento e base, considerando as demais camadas como complementares à base. A Figura 1 ilustra a disposição dessas camadas.

Figura 1 - Camadas dos pavimentos flexíveis



Fonte: CNT (2018).

A CNT (2018) aponta que um dos principais problemas encontrados no Brasil, quanto a esse tipo de pavimento, é o não cumprimento às exigências legais relacionadas à capacidade de suporte de cada camada. Outra questão que muitas vezes não é levada em consideração, está relacionada à qualidade dos materiais utilizados, que é menor do que a mínima exigida.

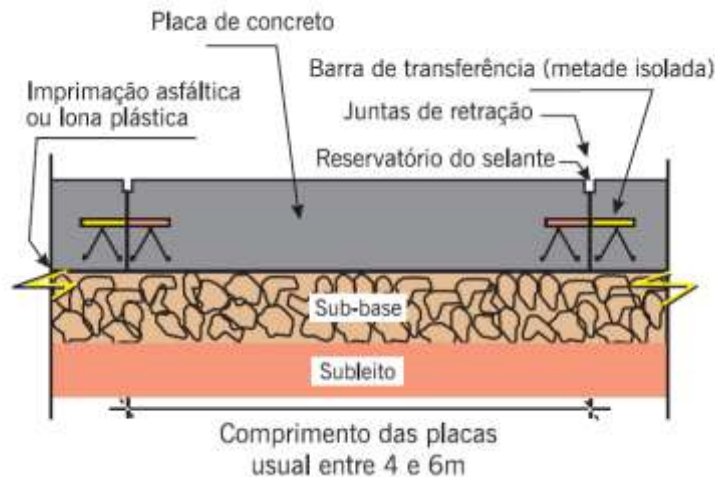
A falta de manutenção periódica também complementa os problemas citados acima, levando a falhas construtivas e, conseqüentemente, aumento nos acidentes (CNT, 2018). Ademais, os custos para reparação destes pavimentos aumentam, gerando um ciclo vicioso de gastos desnecessários (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.4.2 Pavimentos rígidos

Como seu nome sugere, os pavimentos rígidos possuem elevada rigidez comparada às camadas inferiores e, por conseguinte, absorve praticamente todas as tensões advindas da carga

aplicada (DNIT, 2006). São aqueles em que o revestimento é “constituído por placas de concreto de cimento Portland (raramente é armado) assentados sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária” (MEDINA e MOTTA, 2005). A resistência à flexão das placas de concreto e das camadas subjacentes define a espessura do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2006). A subcamada deste pavimento é habitualmente designada como sub-base, pois a qualidade desse material equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2006). A Figura 2 ilustra um corte longitudinal de uma seção típica deste tipo de pavimento.

Figura 2 - Seção típica de pavimentos rígidos



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006.

O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), aponta a existência dos seguintes tipos de pavimentos rígidos:

- Pavimento de Concreto Simples convencional ou Concreto rolado;
- Pavimento tipo *whitetopping*;
- Pavimento com fibras de aço ou polipropileno;
- Pavimento com sobre-laje em tabuleiros de obra de arte especiais;
- Pavimento com armação simples de retração
- Pavimento estruturalmente armado, com armação dupla;
- Pavimento com peças pré-moldadas.

2.5 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

O Concreto Compactado com Rolo (CCR) recebe seu nome devido aos rolos compactadores necessários para confirmá-lo em sua forma final (HARRINGTON *et al.*, 2010). O DNIT 059 (2014) define o CCR como um concreto simples destinado a pavimentos, como revestimento e base, que apresenta consistência bastante seca (*zero slump*), permitindo a compactação com rolos compressores ou similares. Também conhecido como concreto pobre rolado ou simplesmente concreto rolado, é utilizado na pavimentação desde 1893, e no Brasil a partir dos anos 50 (DNIT, 2005). É indicado para barragens, bases de pavimentos urbanos de concreto e sub-bases de pavimentos flexíveis (HARRINGTON *et al.*, 2010).

É composto pelos mesmos materiais que os de concretos convencionais (isto é: agregados, cimento e água), mas com proporções distintas (HARRINGTON *et al.*, 2010). O Quadro 1 aponta as principais diferenças entre os pavimentos de concreto convencionais e os pavimentos de CCR.

Quadro 1 – Principais diferenças entre pavimentos de concreto convencional e CCR

Materiais gerais e práticas	Pavimentos em Concreto Convencional	Pavimentos em CCR
Proporções da mistura de materiais	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 menor teor de cimento e água.
Trabalhabilidade	Mistura é fluída.	A mistura tem consistência densa.
Fratura, transferência de carga e reforço	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.
Acabamento	Mecanicamente texturizado	Tipicamente apresenta textura similar ao asfalto, mas em alguns casos a textura pode assemelhar-se ao concreto convencional.

Fonte: adaptado de Harrington *et al.*, 2010.

Pavimentos de CCR são fortes, densos, duráveis, de rápida execução e econômicos, sendo uma alternativa excelente para, por exemplo, áreas de estacionamento e armazenagem (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Foi tradicionalmente usado para transporte de cargas pesadas em áreas de baixa velocidade devido sua superfície relativamente áspera, entretanto, nos últimos anos seu uso em áreas comerciais e rodovias vem aumentando. (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Harrington *et al.* (2010) cita diversas aplicações típicas do CCR:

- Estradas de acesso a plantas industriais e estacionamentos
- Estaleiros, portos e docas de carregamento intermodais
- Terminais de caminhão/carga, armazenamento de mercadorias a granel e centros de distribuição
- Estradas urbanas e rurais de baixo volume
- Áreas de estacionamento de aeronaves
- Zonas militares de carregamento de longo ou curto prazo, bases de avanço ou operação e aeródromos
- Grandes estacionamentos comerciais
- Estradas em parques públicos
- Faixas de viagem temporária que devem ser construídas rapidamente para desviar o tráfego

As vantagens deste tipo de concreto são o baixo custo (pois há menor consumo de cimento), a alta velocidade de aplicação e a possibilidade de pavimentos de menor espessura (HARRINGTON *et al.*, 2010).

O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005) afirma a potencialidade do CCR na pavimentação e recomenda que os órgãos rodoviários se municiem de conhecimentos para aperfeiçoar as Normas ou Instruções de Serviço relativos a esse tipo de pavimento rígido. Atualmente, a Norma existente é a DNIT 059/2004-ES, relativa ao uso simultâneo do CCR como camada de base e de revestimento (DNIT, 2005).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT/NBR 16312-2 (2015) estabelece que o agregado miúdo utilizado na produção do CCR deve assegurar a produção de um concreto trabalhável, com boa compacidade e que proporcione um acabamento adequado. Ainda pela ABNT/NBR 16312-2 (2015), o agregado graúdo deve apresentar, preferencialmente, dimensões máximas de 19mm a 50mm.

2.6 ADIÇÕES MINERAIS

Atualmente as adições minerais mais utilizadas na construção civil são os resíduos gerados por diversos setores da economia, que poderiam apresentar risco de contaminação ambiental se descartados de forma incorreta (DAL MOLIN, 2005).

Para Malhotra e Mehta (1996), o termo “adição mineral” refere-se à adição de qualquer material utilizado como ingrediente do concreto, com exceção de água, agregados e cimento, adicionado à mistura imediatamente antes ou durante a preparação do concreto.

Para a ABNT/NBR 11172 (1990) adições são produtos de origem mineral que são adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, tendo como finalidade alterar suas características.

É importante ressaltar a diferença de aditivos e adições minerais, às vezes julgados como sinônimos (FONSECA, 2010). Por apresentar propriedades semelhantes às do cimento, as adições minerais possuem a função de somar ou substituí-lo, parcialmente, já os aditivos alteram as propriedades do cimento, sem substituição ou mudança nas proporções do mesmo (FONSECA, 2010).

Silva (2006) classifica as adições minerais em três categorias: material pozolânico, material cimentante e material não reativo (ou filler).

A ABNT/NBR 11172 (1990) define os materiais pozolânicos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, com pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades hidráulicas. As cinzas vulcânicas, argilas calcinadas e cinzas de carvão pulverizado estão entre os materiais pozolânicos comumente usados (MALHOTRA E MEHTA, 1996).

Em contrapartida, os materiais cimentantes contêm cálcio suficiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias após interação com a água (DAL MOLIN, 2005). Alguns

exemplos desses materiais são a escória granulada de alto-forno e as cinzas volantes com alto teor de cálcio (MALHOTRA E MEHTA, 1996).

Já o material não inerte, mais conhecido como filler é considerado material não-plástico e não apresenta propriedades químicas (DNIT, 2006). A cal extinta e o pó de chaminé são exemplos dessa classe de adição mineral (DNIT, 2006).

2.6.1 Cinza de madeira

Bennack (2016) aponta que este resíduo é gerado por diversos setores da economia e é proveniente da queima incompleta da madeira ao ser utilizada como fonte de energia. Após serem recolhidas através de filtros (cinzas volantes) e do fundo das fornalhas (cinzas de fundo), milhares de toneladas deste resíduo são encaminhadas para aterros e descartadas.

Por outro lado, a demanda por materiais alternativos e sustentáveis tem aumentado exponencialmente na indústria da construção civil (CHERIAF e ROCHA, 2003). Com isso, a utilização da cinza de madeira como adição mineral, torna-se uma alternativa como destinação mais adequada deste resíduo.

Em muitos países, a cinza de fundo já é usada como base na construção de rodovias e produção de blocos de concreto, sendo utilizada como substituto de areia natural (CHERIAF *et al.*, 1999).

As cinzas vegetais que apresentem finura apropriada, alta predominância de sílica e capacidade de ser produzida no estado amorfo podem ser utilizadas como adições minerais (JOHN *et al.*, 2003).

As cinzas da biomassa florestal podem ter composição bastante variável pois dependem de diversos fatores como o tipo de planta, o tipo de resíduo, condições de colheita, armazenamento e combustão, entre outros (HORTA *et al.*, 2010). No entanto, as cinzas de madeira são compostas essencialmente de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , SO_3 , TiO_2 e P_2O_5 (UDOYEO *et al.*, 2006).

Siddique (2012) investigou em sua pesquisa a composição físico-química e mineralógica das cinzas de madeira, estudando sua influência na absorção de água, resistência à compressão, tração e flexão, resistência ao congelamento e descongelamento, retração do concreto e seu comportamento à lixiviação. Concluiu que, ao aumentar o teor de cinza de madeira, a capacidade

de absorção de água do concreto também aumenta. Também concluiu que a resistência do concreto diminui ligeiramente com o aumento no teor de cinza, mas aumenta com o tempo, pois o resíduo apresenta ação pozolânica. Ademais, Siddique (2012) afirma que as cinzas de madeira podem ser usadas na produção de peças pré-moldadas e concretos estruturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são especificados os materiais e métodos utilizados na pesquisa experimental no laboratório da UFSC Joinville. A Figura 3 apresenta o fluxograma das etapas executadas durante a pesquisa.

Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental da pesquisa



Fonte: Autora, 2019.

3.1 MATERIAIS

O Concreto Compactado a Rolo (CCR) é composto pelos materiais usuais de um concreto normal, isto é: água, areia, brita e cimento. Cada um destes materiais foi caracterizado de acordo com as normas vigentes. A cinza de madeira moída também foi caracterizada, a fim de substituir parcialmente a areia na fabricação do CCR.

3.1.1 Água

A água utilizada na produção dos corpos de prova CCR foi proveniente pela empresa Águas de Joinville, através da rede pública de abastecimento da cidade de Joinville, Santa Catarina.

3.1.2 Cimento

Classificado como CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência inicial), o cimento escolhido para a mistura (Figura 4) é da marca Votoran da linha Obras Especiais. Este tipo de cimento é conhecido por atingir altos índices de resistência já nos primeiros dias da aplicação.

Figura 4 – Cimento CP V ARI



Fonte: Autora, 2019.

A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas do material.

Tabela 1 – Especificações técnicas do cimento

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

Fonte: ABNT/NBR 16697, (2018).

3.1.3 Agregado Miúdo

O material utilizado como agregado miúdo foi caracterizado como areia média e tem origem na região de Joinville/SC, mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Areia média



Fonte: Autora, 2019.

3.1.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a Brita 0 (também conhecida como pedrisco) por ser a mais adequada para o estudo. A Figura 6 apresenta uma amostra do material, que foi obtido na região de Joinville/SC.

Figura 6 – Brita 0



Fonte: Autora, 2019.

3.1.5 Resíduo

Proveniente de uma empresa que produz artigos de madeira na cidade de Araucária/PR, a cinza de madeira utilizada na composição dos corpos de prova é resultante da queima incompleta do Pinus. As sobras advindas do processo de produção são lançadas em fornalhas para produção de energia. Após isso, as cinzas decorrentes deste processo são captadas através dos filtros e encaminhadas para aterros. Como parte dos objetivos deste estudo, a cinza de madeira foi tratada (através do processo de moagem) para análise do impacto desse tratamento na resistência final do CCR. A Figura 7 ilustra o material já tratado.

Figura 7 – Cinza de madeira moída



Fonte: Autora, 2019.

A pesquisa de Bennack (2016) determinou a massa específica das cinzas captadas por filtros, conforme conta na Tabela 2. O material utilizado neste trabalho é proveniente do mesmo local, portanto apresenta mesmo valor de massa específica.

Tabela 2 – Massa específica da cinza de madeira

Resíduo	Massa específica (g/cm ³)
Cinza de madeira (120°C)	2,78
Cinza de madeira (900°C)	3,36

Fonte: Bennack, 2016.

3.2 MÉTODOS

Os métodos listados neste capítulo foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC Joinville. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório da Perville. Os ensaios para determinação de granulometria, massa específica e absorção de água dos materiais foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC Joinville e de acordo com as especificações a ABNT/NBR NM 248 (2003). Abaixo são descritos detalhadamente os ensaios realizados.

3.2.1 Tratamento do resíduo

Para o tratamento foi utilizado um Moinho CT-242 Servitech, mostrado na Figura 8, que permite a moagem de pequenas amostras a seco ou úmido.

Figura 8 – Moinho utilizado na moagem da cinza de madeira



Fonte: Autora, 2019.

O processo da moagem foi realizado por meio de jarros que contém esferas de porcelana de diferentes diâmetros, conforme apresentado na Figura 9. O motivo pelo qual devem ser usados vários diâmetros é que as esferas maiores atuam na ruptura do material, enquanto as menores auxiliam na obtenção de partículas mais finas, possibilitando um maior rendimento da moagem (BRISTOT, 1996).

Figura 9 – Jarro e esferas do moinho



Fonte: Autora, 2019.

Primeiramente, as esferas foram inseridas no jarro ocupando cerca de 60% do volume disponível. Na sequência, foi adicionado o material a ser moído (cerca de 40% do volume do jarro). Então, os jarros foram fixados no moinho (Figura 10) e o mesmo foi acionado, sendo realizada a moagem pela fricção entre as esferas.

Figura 10 – Jarros fixados dentro do moinho.



Fonte: Autora, 2019.

O material permaneceu no moinho durante 5 minutos. Finalmente, a cinza foi retirada dos jarros e armazenada para posterior produção dos corpos de prova.

3.2.2 Caracterização física do agregado miúdo

3.2.2.1 Granulometria do agregado miúdo

Primeiramente, uma amostra de 1000g do agregado miúdo foi separada. Então, a amostra foi secas em estufa por 24h e esfriada à temperatura ambiente. Após isso, a amostra foi dividida em duas partes iguais, pesadas e ensaiadas. Sendo assim, o agregado foi ensaiado duas vezes e o resultado encontrado refere-se à média entre os ensaios.

As peneiras foram limpas e encaixadas por ordem de abertura de malha (9,5mm-6,3mm-4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm) de maneira a formar um conjunto único, provido de fundo e tampa. A amostra foi então despejada na peneira de maior abertura, a tampa foi fechada e o conjunto foi encaixado no agitador mecânico (Figura 11). Após 10 minutos, a primeira

peneira foi destacada do conjunto e agitada manualmente por dois minutos. O material passante foi transferido para a próxima peneira de menor abertura e o processo foi repetido para as demais peneiras. Cada peneira foi pesada cuidadosamente para determinar a massa retida em cada abertura e a massa total, que de acordo com a ABNT/NBR NM 248 (2003) não deve diferir mais que 0,3% da massa inicial.

Figura 11 – Agitador mecânico para granulometria



Fonte: Autora, 2019.

3.2.2.2 Massa específica do agregado miúdo

A massa específica é obtida pela relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis, conforme definido pela ABNT/NBR NM 52 (2009). Os procedimentos para a determinação da massa específica do agregado miúdo foram feitos de acordo com a ABNT/NBR NM 52 (2009).

Inicialmente pesou-se 500g (m_s) de agregado miúdo e em seguida o material foi inserido no frasco (aferido em norma, de 500cm³ de capacidade) para registro da massa do conjunto (m_1). Após isso, adicionou-se água até a marca de 500ml e foram realizados movimentos circulares com

o frasco para remoção das bolhas de ar. A partir daí, o frasco foi para banho mantido a temperatura constante de (21 ± 2) °C.

Depois de aproximadamente 1h, o frasco foi completado com água até a marca de 500cm³ e pesado para determinar a massa total (m_2). Finalmente, o agregado miúdo foi retirado do frasco, secado em estufa por 24h, esfriado à temperatura ambiente e novamente pesado com precisão de 0,1g (m).

A massa específica aparente do agregado miúdo seco foi obtida pela equação 1:

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

Onde:

d_1 – massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)

m – massa da amostra seca em estufa (g)

V – volume do frasco (cm³)

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm³)

O volume de água adicionado ao frasco (V_a) foi calculado através da equação 2:

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

Onde:

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm³)

m_1 – massa do conjunto (frasco + agregado) em g

m_2 – massa total (frasco + agregado + água) em g

ρ_a – massa específica da água (g/cm³)

A massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2) foi determinada pela equação 3:

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

Onde:

d_2 – massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3)

m_s – massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V – volume do frasco (cm^3)

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3)

A equação 4 fornece a massa específica do agregado (d_3):

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

Onde:

d_3 – massa específica do agregado (g/cm^3)

m – massa da amostra seca em estufa (g)

m_s – massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V – volume do frasco (cm^3)

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3)

ρ_a – massa específica da água (g/cm^3)

3.2.2.3 Absorção de água do agregado miúdo

A absorção de água do agregado miúdo foi definida através do método utilizado por Bennack (2016), porém com algumas adaptações. Para determinar o volume ocupado pela areia, usou-se um molde metálico cilíndrico de 5cm de diâmetro por 9cm de altura. O agregado foi pesado e colocado em camadas no molde, com o auxílio do soquete, até atingir a superfície do mesmo.

Adicionou-se água em um frasco até atingir a marca de 200 cm^3 e após esperar tempo suficiente para que toda a água escorresse pelas paredes do recipiente, o agregado foi passado do molde metálico ao frasco. Para garantir a total absorção das partículas, somente após 5 dias foi realizada a leitura final do ensaio.

As equações 5 e 6 foram utilizadas para a determinação da absorção de água do agregado miúdo:

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

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

Onde:

A_{Ab} – Água absorvida (cm³)

$V_{\text{água+agregado}}$ – soma entre o volume inicial de água e o volume do molde (cm³)

V_f – volume aferido no frasco após 5 dias (cm³)

Ab – absorção final do agregado miúdo (%)

3.2.3 Caracterização física do agregado graúdo

3.2.3.1 Granulometria do agregado graúdo

O ensaio de granulometria do agregado graúdo seguiu as orientações da ABNT/NBR NM 53 (2009) e os mesmos procedimentos citados no item 3.2.2.1 Granulometria do agregado miúdo.

3.2.3.2 Massa específica do agregado graúdo

Para a determinação da massa específica do agregado graúdo, foram separados 2kg do material e submergiu-se esta amostra em água à temperatura ambiente por 24 horas. Em seguida, a amostra foi retirada do recipiente e a água visível foi removida com o auxílio de um pano absorvente.

Imediatamente após esse passo, a amostra foi pesada e anotada a massa como m_s (massa do agregado saturado superfície seca). Então a amostra foi submergida em água novamente e pesada para obter a massa em água m_a .

Após isso, o agregado graúdo foi seco em estufa até massa constante, esfriado até atingir temperatura ambiente e pesado com precisão de 1g (m , agregado seco).

A massa específica do agregado seco foi obtida através da equação 7:

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

Onde:

d – massa específica do agregado seco (g/cm³)

m – massa ao ar da amostra seca (g)

m_s – massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)

m_a – massa em água da amostra (g)

A determinação da massa específica do agregado na condição saturado superfície seca foi efetuada pela equação 8:

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

Onde:

d_s – massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm³)

m_s – massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)

m_a – massa em água da amostra (g)

A massa específica aparente do agregado seco também foi calculada conforme equação 9:

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (9)$$

Onde:

d_a – massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)

m – massa ao ar da amostra seca (g)

m_s – massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)

m_a – massa em água da amostra (g)

3.2.3.3 Absorção de água do agregado graúdo

Através da equação 10 foi calculada também a absorção de água do agregado graúdo:

$$A = \frac{m_s - m_a}{m} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

A – absorção de água (%)

m – massa ao ar da amostra seca (g)

m_s – massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)

m_a – massa em água da amostra (g)

Nota: Excluindo-se os vazios permeáveis, a diferença ($m_s - m_a$) é numericamente igual ao volume do agregado.

3.2.4 Caracterização física do resíduo

O resíduo foi caracterizado por meio dos ensaios de granulometria e absorção de água.

3.2.4.1 Granulometria do resíduo

A distribuição granulométrica foi obtida seguindo os mesmos procedimentos descritos no item 3.2.2.1 Granulometria do agregado miúdo. Através deste ensaio, puderam ser determinados o módulo de finura e o diâmetro máximo das partículas da cinza.

3.2.4.2 Absorção de água do resíduo

O método para definir a absorção de água do resíduo também foi proposto por Bennack (2016). Em primeiro lugar, uma amostra previamente seca de 100g da cinza de madeira foi posta em um molde cilíndrico (5x10cm). A colocação foi feita por camadas, compactando o material com o soquete, até atingir metade da altura do molde.

Então, o volume ocupado pelo resíduo foi calculado e o mesmo foi retirado do recipiente e pesado em balança com resolução de 0,1g. Foram adicionados 200ml de água a temperatura ambiente em um recipiente cilíndrico. Em seguida, incorporou-se a cinza, que foi misturada à água com o auxílio de uma haste de vidro, e pesou-se para obter-se o volume total.

O resultado foi dado pela “diferença volumétrica entre a amostra final e a soma do volume da água com o volume do resíduo compactado separadamente” (BENNACK, 2016).

3.2.5 Produção do CCR

3.2.5.1 Dosagem

A dosagem utilizada na preparação do CCR foi proposta por TRICHÊS (1993), conforme equação 11:

$$C_c = \frac{1000 - V}{\frac{1}{ME_c} + \frac{1}{ME_{ag}} + \frac{h(1+m)}{100}} \quad (11)$$

Onde:

C_c – Consumo de cimento da mistura (kg/m³)

V – Volume de vazios na mistura (L)

m – Quantidade de agregado total por quantidade de cimento (m³ de CCR)

h – Teor de umidade da mistura (%)

$ME_{cimento}$ – Massa específica do cimento (kg/m³)

$ME_{agregado}$ – Massa específica do agregado total (cm³)

O estudo utilizou uma dosagem de 100 kg/m³ de cimento e umidade de 7% sobre a massa total seca como sendo a referência. Com o objetivo de investigar o comportamento do CCR com cinza de madeira tratada, a mesma dosagem foi utilizada substituindo 7,5% e 15% da quantidade de areia pelo resíduo.

3.2.5.2 Execução dos corpos de prova

Todos os agregados foram separados, secos em estufa, esfriados à temperatura ambiente e pesados de acordo com a dosagem descrita anteriormente. Após isso, utilizou-se uma betoneira elétrica com capacidade de 140 litros para a mistura dos ingredientes. Inicialmente foi adicionada a brita 0 e metade da água no equipamento e misturado por aproximadamente 1 minuto. Logo na sequência o cimento, a areia e o restante da água foram despejados e misturados novamente. Nas formulações que levaram cinza de madeira, o resíduo foi adicionado após a areia e antes da segunda metade da água.

Com o CCR pronto, o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*) foi realizado de acordo com a ABNT/NBR NM 67 (1998). Primeiramente, o molde e a placa de base foram umedecidos com água e posicionados no chão, um sobre o outro. Após isso, preencheu-se o cone com o concreto, em três camadas (cada uma com aproximadamente 1/3 da altura do tronco de cone), compactadas em cada intervalo através da aplicação de 25 golpes. Enfim, o tronco de cone foi removido cuidadosamente e observada a altura do corpo de prova desmoldado. O ensaio foi realizado três vezes: uma para cada formulação. O CCR é um concreto seco e que deve apresentar *slump zero*. Apenas após alcançar essa condição, os corpos de prova foram executados.

Cada molde cilíndrico de 10x20cm foi preenchido por camadas e compactado com o auxílio do soquete grande especificado de acordo com a ABNT/NBR 7182 (2016), por meio da aplicação de 21 golpes sucessivos. O soquete grande pesa 4,53kg e conta com uma altura de queda de 45cm. Foram produzidos 5 corpos de prova para cada formulação (referência, 7,5% e 15%), totalizando 15 corpos de prova.

Após 24h, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e depositados em tanque com água não corrente saturada em cal durante 28 dias.

3.2.6 Determinação das propriedades do CCR

3.2.6.1 Ensaio de resistência à compressão axial simples

Os ensaios de resistência à compressão simples dos corpos de prova foram realizados em conformidade com a ABNT/NBR 5739 (2007) no laboratório da Perville Engenharia e Empreendimentos, empresa situada em Joinville/SC.

Os corpos de prova foram retirados do tanque e rompidos aos 28 dias de cura em prensa hidráulica, mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Prensa hidráulica para rompimento dos corpos de prova



Fonte: Autora, 2019.

A resistência à compressão simples foi calculada através da equação 12:

$$f_c = \frac{4xF}{\pi x D^2} \quad (12)$$

Onde:

f_c – Resistência à compressão (MPa)

F – Carga máxima obtida no ensaio (kgf)

D – diâmetro do corpo de prova (mm)

3.2.6.2 Determinação da densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Com o objetivo de determinar as propriedades físicas do CCR, a ABNT/NBR 9778 (2005) e ABNT/NBR 9779 (2012) foram respeitadas. Fragmentos dos corpos de prova rompidos aos 28 dias foram secos em estufa por 24h e pesados (M_s) após esfriamento à temperatura ambiente. Depois, os mesmos foram submersos em água por 72h e pesadas as massas imersas (M_i). Enfim, os fragmentos passaram por secagem superficial e novamente pesados (M_{sss}).

As equações 13, 14 e 15 forneceram os valores da absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta, respectivamente:

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100 (\%) \quad (13)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_i} (\text{g/cm}^3) \quad (14)$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100 (\%) \quad (15)$$

Onde:

M_{sss} – Massa saturada com superfície seca (kg)

M_s – Massa seca em estufa (kg)

M_i – Massa imersa em água (kg)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

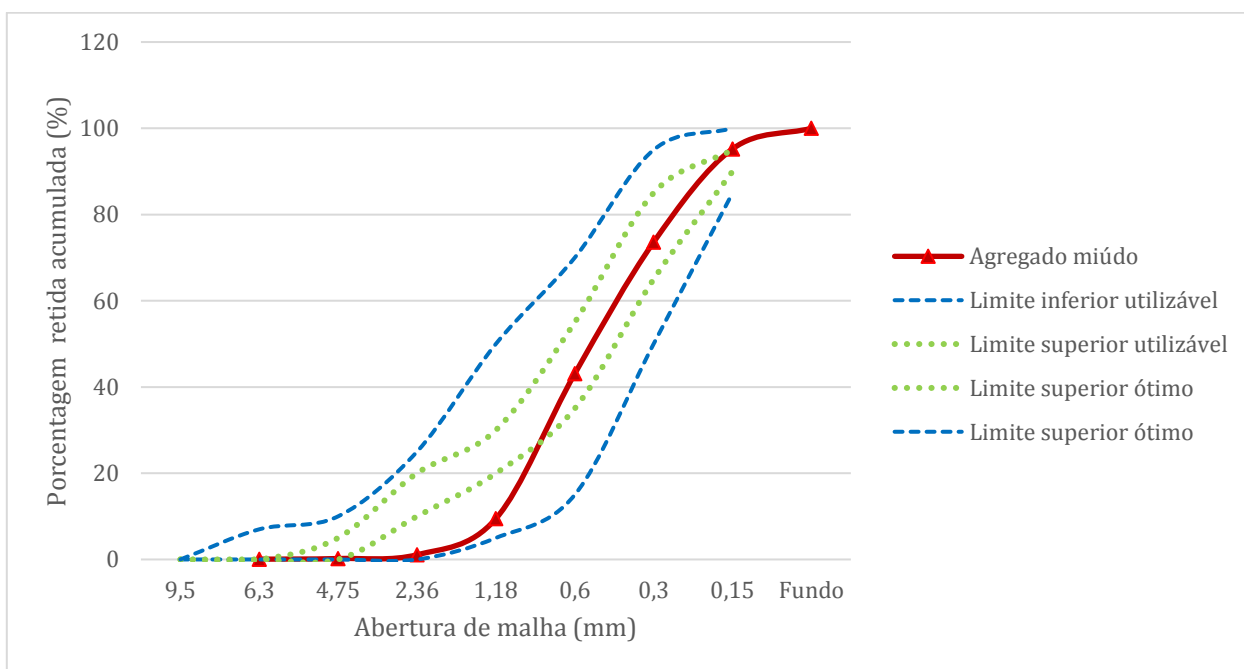
Este capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos a partir da caracterização física dos agregados e do resíduo, na produção dos corpos de prova e na determinação das propriedades do CCR.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

4.1.1 Granulometria do agregado miúdo

O agregado miúdo apresentou uma curva granulométrica (Gráfico 2) completamente dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela norma ABNT/NBR 7211 (2009) para a produção do concreto, também mostrando-se parcialmente nos limites ótimos.

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora, 2019.

A partir da soma das porcentagens retidas acumuladas foi calculado o módulo de finura do agregado miúdo e determinada a dimensão máxima característica conforme definido na norma ABNT/NBR 248 (2003) apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado miúdo

Material	Diâmetro máximo característico	Módulo de finura (%)
Agregado miúdo	2,36mm	2,23

Fonte: Autora, 2019.

Segundo a ABNT/NBR 7211 (1983), as areias podem ser classificadas de acordo com seu módulo de finura (MF) como:

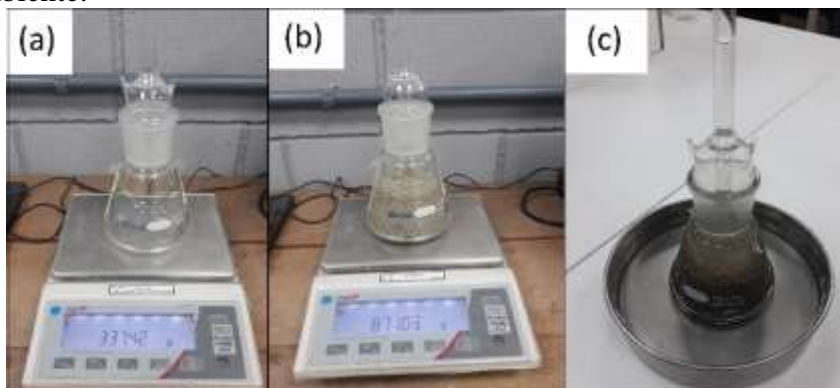
- muito finas – $1,35 < MF < 2,25$;
- finas – $1,71 < MF < 2,78$;
- médias – $2,11 < MF < 3,28$;
- grossas – $2,71 < MF < 4,02$.

Sendo assim, o agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi classificado como areia média por encontrar-se na faixa entre 2,11 e 3,28.

4.1.2 Massa específica do agregado miúdo

A Figura 13 apresenta algumas das etapas realizadas para a determinação da massa específica do agregado miúdo.

Figura 13 – Frasco vazio (a); Conjunto frasco mais agregado (b); Conjunto em banho à temperatura ambiente.



Fonte: Autora, 2019.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos através das formulações apresentadas no item 3.2.2.2 Granulometria do agregado miúdo.

Tabela 4 – Massa específica do agregado miúdo

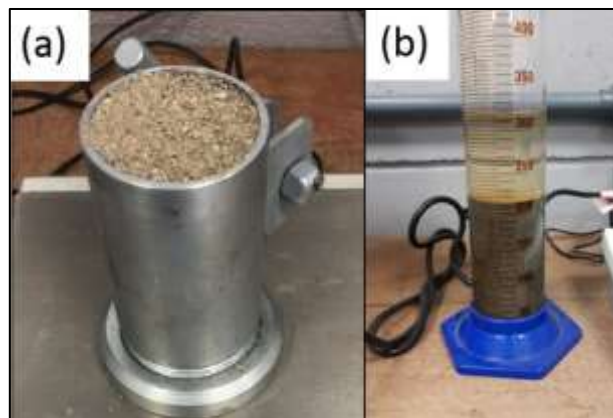
Agregado miúdo	Propriedade		
	<i>d1</i> - Massa específica aparente (g/cm ³)	<i>d2</i> - Massa específica superfície seca (g/cm ³)	<i>d3</i> - Massa específica (g/cm ³)
Areia média	2,5	2,51	2,52

Fonte: Autora, 2019.

4.1.3 Absorção de água do agregado miúdo

O molde cilíndrico utilizado na determinação do volume ocupado pelo material e a leitura final do ensaio após 5 dias são mostrados na Figura 14.

Figura 14 – Molde cilíndrico preenchido (a); Leitura final do ensaio (b)



Fonte: Autora, 2019.

O valor em porcentagem da absorção de água do agregado miúdo está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Absorção de água do agregado miúdo

Agregado miúdo	Absorção de água (%)
Areia média	18,96

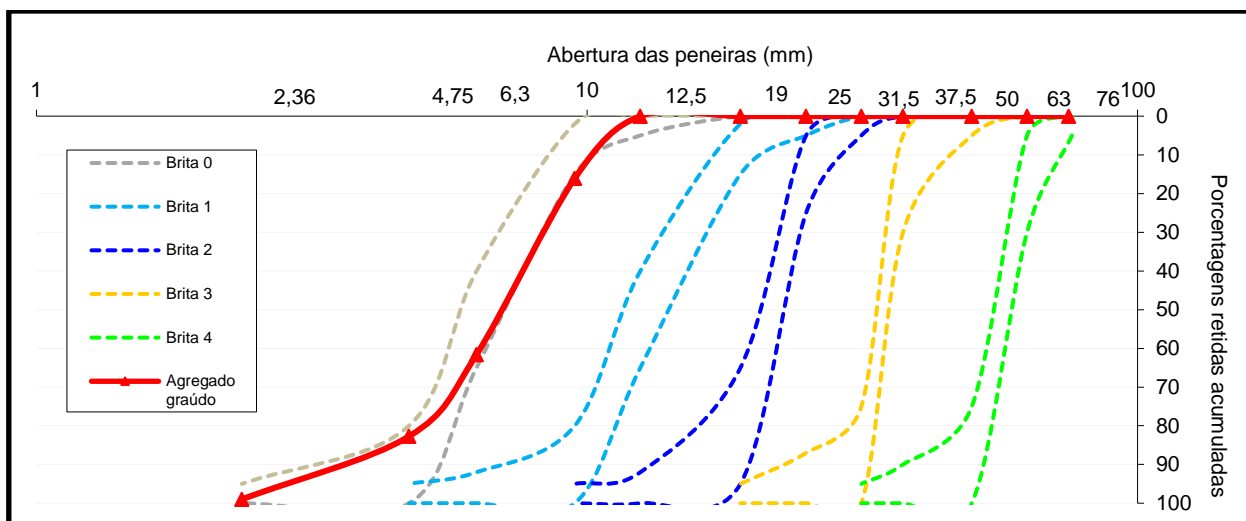
Fonte: Autora, 2019.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

4.2.1 Granulometria do agregado graúdo

Através dos dados obtidos do ensaio foi traçada a curva granulométrica (Gráfico 3) do agregado graúdo, o qual foi classificado de acordo com a ABNT/NBR 7211 (2009) como brita zero.

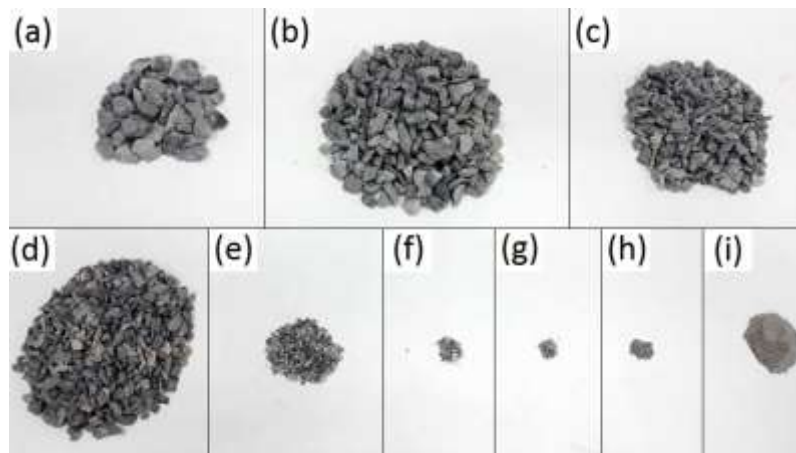
Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora, 2019.

Com o intuito de melhor ilustrar os resultados do ensaio, a Figura 15 apresenta as frações de agregado graúdo retidas nas peneiras.

Figura 15 – Frações retidas nas peneiras: 9,5mm (a); 6,3mm (b); 4,75mm (c); 2,36mm (d); 1,18mm (e); 0,6mm (f); 0,3mm (g); 0,15mm (h); Fundo (i).



Fonte: Autora, 2019.

O módulo de finura e o diâmetro máximo característico do agregado miúdo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado graúdo

Material	Diâmetro máximo característico	Módulo de finura
Agregado graúdo	9,5mm	6,42

Fonte: Autora, 2019.

4.2.2 Massa específica do agregado graúdo

As pesagens realizadas no ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo são ilustradas na Figura 16.

Figura 16 – Pesagem na condição saturada superfície seca (a); Pesagem na condição imersa (b); Pesagem após estufa (c)



Fonte: Autora, 2019.

Os resultados da massa específica obtidos são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa específica do agregado graúdo

Agregado graúdo	Propriedade		
	Massa específica aparente (g/cm ³)	Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	Massa específica do agregado seco (g/cm ³)
Areia média	2,36	2,46	2,64

Fonte: Autora, 2019.

4.2.3 Absorção de água do agregado graúdo

O valor em porcentagem da absorção de água do agregado graúdo adquirido no ensaio é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Absorção de água do agregado graúdo

Agregado graúdo	Absorção de água (%)
Brita 0	4,53

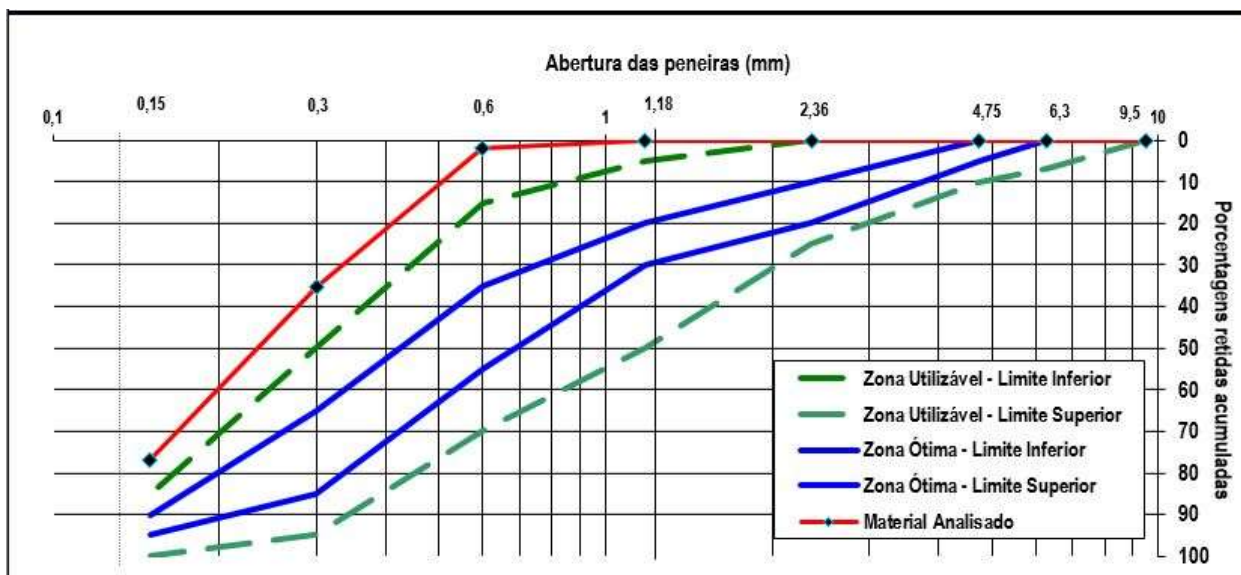
Fonte: Autora, 2019.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

4.3.1 Granulometria do resíduo

Um dos objetivos deste trabalho foi realizar o tratamento do resíduo a fim de investigar sobre seu desempenho na produção do CCR. O processo da moagem alterou a granulometria do resíduo gerando a curva mostrada no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Curva granulométrica do resíduo tratado



Fonte: Autora, 2019.

A Tabela 9 apresenta o diâmetro máximo característico e o módulo de finura encontrado nos ensaios.

Tabela 9 – Módulo de finura e diâmetro máximo característico do agregado graúdo

Material	Diâmetro máximo característico	Módulo de finura
Resíduo tratado	0,6mm	1,14

Fonte: Autora, 2019.

4.3.2 Absorção de água do resíduo

A Figura 17 mostra o molde e o soquete utilizados no ensaio e a leitura do volume final no frasco.

Figura 17 – Molde cilíndrico com resíduo (a); Leitura final do ensaio (b)



Fonte: Autora, 2019.

A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio de absorção de água da cinza de madeira moída.

Tabela 10 – Absorção de água do resíduo tratado

Resíduo	Absorção de água (%)
Cinza de madeira	18,98

Fonte: Autora, 2019.

4.4 PRODUÇÃO DO CCR

4.4.1 Dosagem

As quantidades usadas na formulação de cada formulação dos corpos de prova de CCR são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova

Formulação	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
Referência	1	10,85	10,85	0	1,48
Adição de resíduo (7,5%)	1	10,04	10,85	0,81	1,48
Adição de resíduo (15%)	1	9,22	10,85	1,63	1,48

Fonte: Autora, 2019.

Como a absorção da água e do resíduo foram iguais, a relação água/cimento foi mantida para as três formulações.

4.4.2 Execução dos corpos de prova

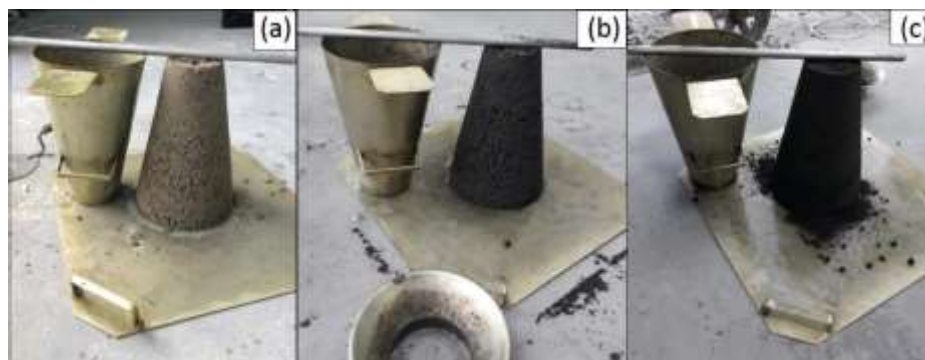
Após separadas as quantidades de cada formulação os materiais foram misturados em betoneira conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Mistura dos materiais em betoneira

Fonte: Autora, 2019.

Os resultados do ensaio de consistência (*slump test*) são mostrados na Figura 19, confirmando “*zero slump*” como previsto.

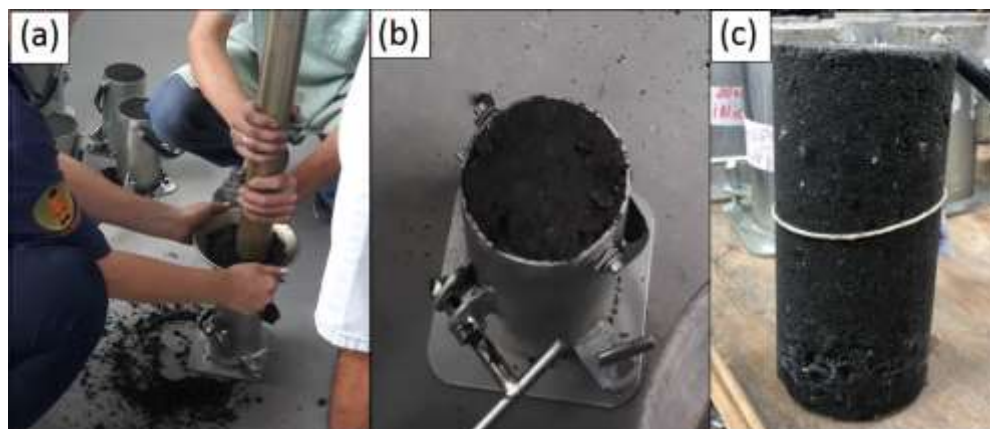
Figura 19 – Slump test: Formulação de referência (a); Formulação com 7,5% de cinza (b);
Formulação com 15% de cinza (c)



Fonte: Autora, 2019.

Os resultados obtidos na moldagem e posterior desmoldagem dos corpos de prova são representados na Figura 20.

Figura 20 – Compactação do CCR nos corpos de prova (a); Corpo de prova recém-concluído (b);
Desmoldagem após 24h (c)



Fonte: Autora, 2019.

Os corpos de prova foram então colocados em um tanque com água não corrente saturada em cal por 28 dias, ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Imersão dos corpos de prova (a); Corpos de prova após 28 dias de cura (b)



Fonte: Autora, 2019.

4.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CCR

4.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial

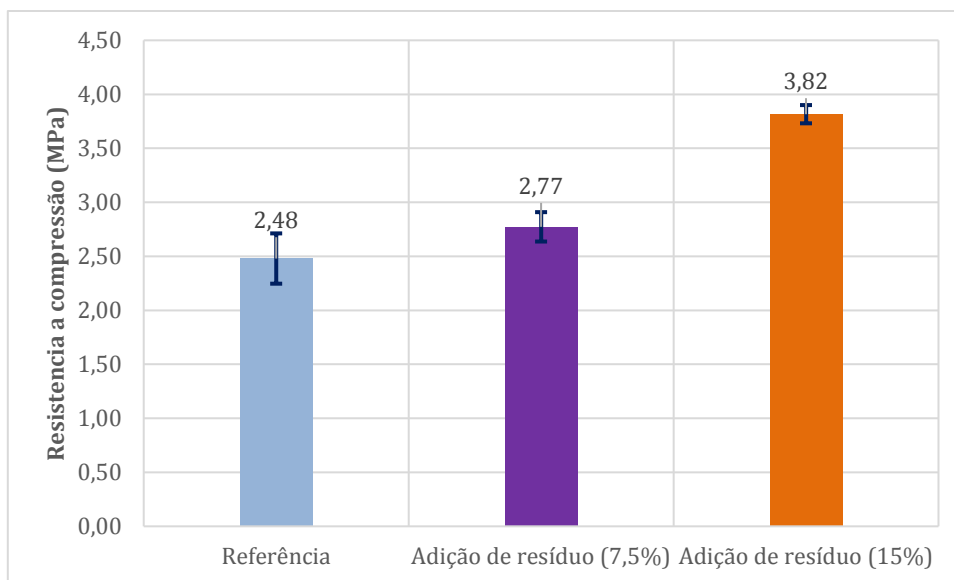
A Tabela 12 mostra os resultados obtidos aos 28 dias para quatro corpos de prova de cada formulação.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do CCR aos 28 dias

Formulação	CP 1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (Mpa)
Referência	2,34	2,24	2,1	2,61	2,48	0,217
Adição de resíduo (7,5%)	2,94	2,66	2,84	2,66	2,77	0,136
Adição de resíduo (15%)	3,86	3,77	3,91	3,72	3,82	0,084

Fonte: Autora, 2019.

O Gráfico 5 ilustra os resultados médios e desvios padrão obtidos nos ensaios para cada formulação: Referência, adição de 7,5% e adição de 15%.

Gráfico 5 – Resistência à compressão média aos 28 dias

Fonte: Autora, 2019.

Sendo assim, pode-se observar que as resistências médias das formulações com adição de 7,5% e 15% apresentaram aumento de 11,69% e 54,03% em relação a referência, respectivamente.

Achy (2018) realizou um estudo semelhante, porém sem o tratamento prévio do resíduo e verificou diminuição na resistência média do CCR com adição de cinza de madeira. Por conseguinte, o aumento de resistência no presente trabalho pode ser justificado possivelmente devido ao tratamento do resíduo que alterou o módulo de finura do material, aumentando a quantidade de finos (BENNACK, 2016).

4.5.2 Ensaio de densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta

Para os ensaios de densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta foram considerados fragmentos de três corpos de prova de cada formulação, mostrados na Figura 22.

Figura 22 – Identificação e separação dos fragmentos (a); Pesagem de fragmento (b)



Fonte: Autora, 2019.

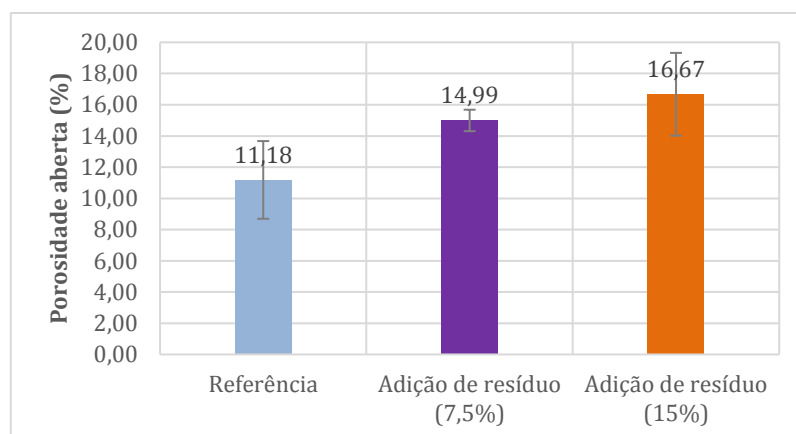
A Tabela 13 apresenta os a média dos resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta

Formulação	Densidade aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade aberta (%)
Referencia	2,14	5,25	11,18
Adição de 7,5%	2,04	7,34	14,99
Adição de 15%	2,15	7,72	16,67

Fonte: Autora, 2019.

Para facilitar a visualização, os valores da tabela anterior foram colocados em gráficos. Os valores da porosidade aberta dos corpos de prova produzidos são exibidos no Gráfico 6.

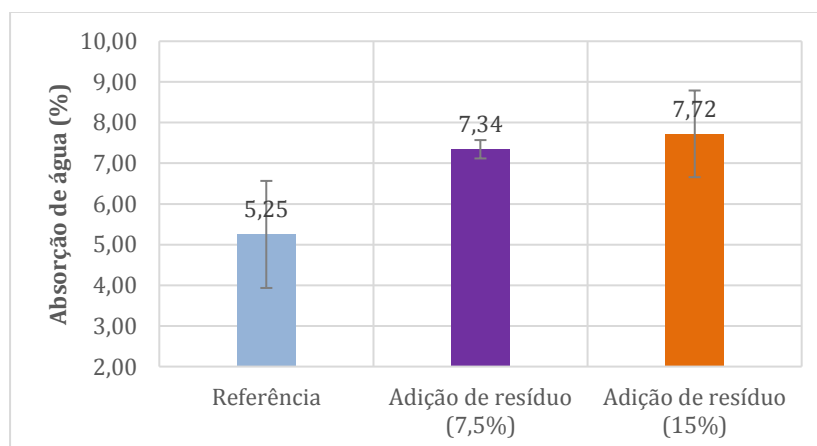
Gráfico 6 – Porosidade aberta dos fragmentos analisados

Fonte: Autora, 2019.

Analisando o gráfico acima, pode-se observar que ao aumentar a porcentagem de resíduo na formulação a porosidade também aumenta, expressando um aumento de 34,08% e 49,10% das formulações com adição de 7,5% e 15% de resíduo em relação à referência, respectivamente.

A porosidade está diretamente relacionada com a absorção de água, uma vez que o resíduo apresenta partículas mais finas que o agregado miúdo, que absorvem mais água inicialmente. No entanto, após o processo de cura do concreto, a água evapora surgindo os poros.

O Gráfico 7 abaixo corrobora esta relação, mostrando um aumento de 39,81% e 47,05% da absorção de água das formulações com adição de 7,5% e 15% de resíduo em relação à referência, respectivamente. Este comportamento também foi observado em resultados obtidos por estudos de Siddique (2012).

Gráfico 7 – Absorção de água dos fragmentos analisados

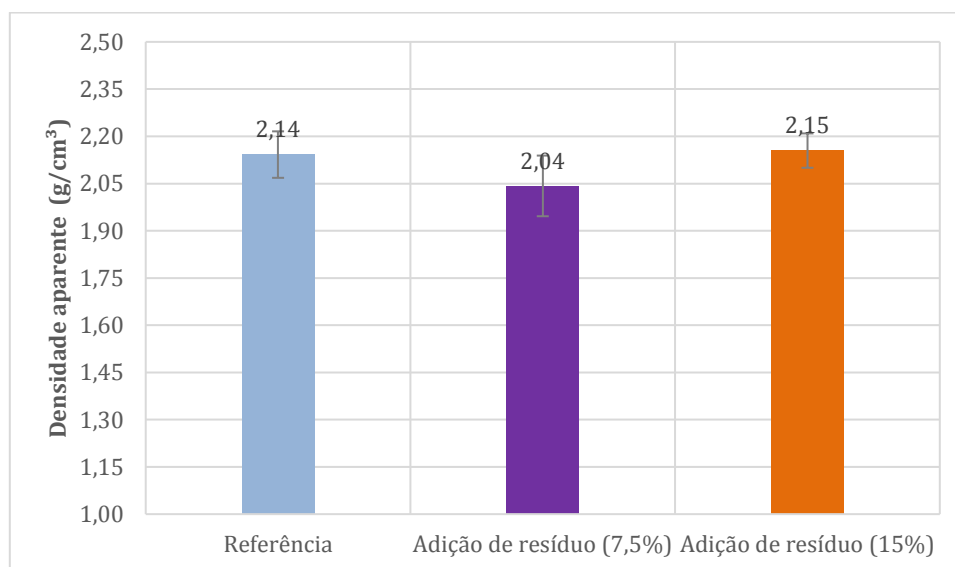
Fonte: Autora, 2019.

Segundo estudos de Siddique (2012), com o aumento da absorção de água e consequentemente a porosidade, ocorre diminuição na resistência do concreto.

Contudo, como pode-se observar, no presente trabalho os resultados mostraram um aumento na resistência à compressão do concreto, fato este que pode estar relacionado à atividade pozolânica do resíduo, de acordo com conclusões de Bennack (2016).

Os resultados da densidade aparente são apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Densidade aparente dos fragmentos analisados



Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que a formulação com adição de 7,5% de resíduo apresentou uma redução de 4,67%, enquanto a formulação com adição de 15% de resíduo resultou num aumento de 0,47%, ambos em relação à referência.

Uma possível causa da redução da densidade na formulação com adição de 7,5% de resíduo estaria relacionada ao peso específico do agregado miúdo e do resíduo que por serem semelhantes, poderiam gerar pequena variação relacionada ao processo de execução. Outra explicação possível seria devido à diferença nas proporções dos fragmentos analisados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho verificou a resistência à compressão dos pavimentos rígidos de Concreto compactado com rolo quando acrescido de cinza de madeira moída, um resíduo proveniente da indústria madeireira.

Todos os objetivos propostos como o tratamento do resíduo, dosagem, execução dos corpos de prova, obtenção do “*slump zero*”, caracterização física dos materiais e determinação das propriedades do CCR foram realmente alcançados.

No presente trabalho a utilização do resíduo moído resultou no aumento da resistência do concreto, sendo que tal fato pode estar relacionado ao tratamento do resíduo pois seu módulo de finura e granulometria foram alterados, demonstrando que a cinza apresenta atividade pozolânica conforme estudos de Bennack (2016).

Os valores de porosidade aberta e absorção de água do CCR aumentaram com a adição do resíduo, resultados também observados em estudos de Siddique (2012). A densidade aparente apresentou variação que pode estar relacionada ao peso específico de alguns dos materiais ou ainda devido a diferença nas proporções dos fragmentos dos corpos de prova analisados.

Por fim, os dados obtidos indicam que o emprego do resíduo da cinza de madeira moída como adição mineral em pavimentos de Concreto compactado com rolo é efetivo, trazendo valor agregado ao mesmo e apoiando a sustentabilidade na construção civil.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento do CCR aos 90 dias de vida;
- Substituir a compactação manual pela mecânica, a fim de reduzir possíveis erros;
- Efetuar o estudo considerando diferentes percentagens de resíduo na dosagem;

REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas 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 7182: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **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.

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.

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

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. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Pesquisa Anual de Serviços**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=29>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

_____. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial**. – Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 20 de maio de 2019.

_____. MINISTÉRIO do Meio Ambiente - MMA. **Construção Sustentável**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel.html>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

_____. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2º ed. Rio de Janeiro, 2005.

BRISTOT, Menegon. **Máquinas e Equipamentos para Cerâmica**. 3. ed. Criciúma: Editora e Livraria Luana LTDA, 1996. Editora e Livraria Luana Ltda.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** (Coleção Habitar v. 4). Porto Alegre: ANTAC, 2003.

CHERIAF, M. et. al. **Pozzolan Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash**. Cement and Concrete Research, 1999.

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: 10 de junho de 2019.

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

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.

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/. Acesso em: 15 de junho de 2019.

HORTA, Carmo et al. **Avaliação do potencial fertilizante de dois resíduos da indústria florestal**. Revista de Ciências Agrárias, Lisboa, v. 33, n. 2, p.147-159, dez. 2010.

JOHN, Vanderley Moacyr et al. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2003.

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

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Edição dos Autores, 2005.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini Ltda, 1997. 1 v.

SIDDIQUE, R. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing**. Resources, Conservation and Recycling, 2012.

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.

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.

VALENTE, A. M.; PASSAGLIA, E.; NOVAES, A. G. **Gerenciamento de transporte e frotas**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.