

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

RAFAELA PAOLA MORETTO

COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COMPACTADO COM
ROLO COM ADIÇÃO DA CINZA DE MADEIRA

Joinville

2020

RAFAELA PAOLA MORETTO

COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COMPACTADO COM
ROLO COM ADIÇÃO DA CINZA DE MADEIRA

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

Orientadora: Dra. Valéria Bennack.

Joinville

2020

RAFAELA PAOLA MORETTO

COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COMPACTADO COM
ROLO COM ADIÇÃO DA CINZA DE MADEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro no curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Valéria Bennack
Orientadora
Presidente

Profa. Dra. Anelize Borges Monteiro
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Ma. Juliana Cristina Frankowiak
Membro
Universidade Estadual de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família, amigos e colaboradores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por não medirem esforços para que eu tivesse a oportunidade de ter um estudo de qualidade, e principalmente por me convencerem a não desistir nas inúmeras vezes que eu tentei.

Agradeço ao meu namorado, Miguel, que nessa reta final foi fundamental para que eu seguisse, me acalmando e mostrando que eu era capaz.

Agradeço a minha família que, mesmo às vezes não concordando, sempre me apoiaram a ir atrás dos meus sonhos e nunca desistir.

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

Agradeço aos amigos que fiz durante este longo período na faculdade, que sempre estiveram presente e se tornaram indispensáveis nessa caminhada. Sou grata a cada experiência compartilhada.

Agradeço aos colegas Ruan Marcos Xavier e Vinicius Krause que me auxiliaram na execução dos ensaios em laboratório.

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

"As consequências de nossos atos são sempre tão complexas,
tão diversas, que prever o futuro é uma tarefa realmente difícil. "

(J.K. Rowling, 1999)

RESUMO

O ramo da construção civil está cada vez mais em busca de alternativas sustentáveis para o desenvolvimento de suas tecnologias, gerando tanto uma redução nos impactos ambientais, como econômicos. O setor industrial é responsável por uma alta geração de resíduos que são nocivos ao meio ambiente. O objetivo deste trabalho é desenvolver análises quanto à viabilidade de empregar tais resíduos, especificamente os resíduos provenientes do processo de combustão da madeira (cinzas), incorporando-os na fabricação do concreto compactado com rolo. O CCR é uma opção que pode ser escolhida quando se procura soluções com resistência maior que o pavimento flexível, possui também uma maior durabilidade e suporta maiores intervalos de tempo entre sua manutenção. Na primeira fase foi realizada a caracterização dos materiais (agregado miúdo, agregado graúdo e cinza de madeira), posteriormente corpos de prova foram moldados com substituição parcial de 5% e 10% do agregado fino por cinza. Foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão axial, porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente. Os ensaios indicaram que a substituição do resíduo resultou no aumento da porosidade aberta e consequente aumento da absorção, diminuição da densidade e da resistência à compressão simples do concreto compactado com rolo.

Palavras-chave: Cinza de madeira. Concreto compactado com rolo. Substituição.

ABSTRACT

The construction industry is increasingly looking for sustainable alternatives for the development of its technologies, generating both a reduction in environmental and economic impacts. The industrial sector is responsible for a high generation of waste that is harmful to the environment. This work aimed to develop analyzes regarding the feasibility of using such residues, specifically residues from the wood combustion process (ash), incorporating them in the manufacture of roller-compacted concrete. RCC is an option that can be chosen when looking for solutions with greater resistance when compared to flexible pavements, it also has greater durability and supports longer intervals between maintenance. In the first phase of this work, the materials were characterized (fine aggregate, coarse aggregate and wood ash), afterwards specimens were molded with partial replacement of 5% and 10% of the fine aggregate by ash. Consistency tests, resistance to axial compression, open porosity, water absorption and apparent density were performed. The tests indicated that the replacement of the residue resulted in an increase in open porosity and a consequent increase in absorption, decrease in density and resistance to simple compression of roller-compacted concrete.

Keywords: Wood ash. Roller compacted concrete. Replacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da condição da superfície do pavimento nas Rodovias Públicas (em%).	15
Figura 2 - Esquema da seção transversal do pavimento rígido	17
Figura 3 - Esquema da seção transversal do pavimento flexível.....	17
Figura 4 - Deformação elástica devido a carga no pavimento flexível	19
Figura 5 - Deformação devido a carga no pavimento rígido.....	20
Figura 6 - Diversos tipos de resíduos da madeira.....	27
Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	30
Figura 8 - Cimento (a); Cinza de madeira (b); Areia (c) e Brita (d).....	32
Figura 9 - Ensaio de granulometria	33
Figura 10 - Frasco Chapman	34
Figura 11 - Fluxograma da execução dos corpos de prova	40
Figura 13 - Fluxograma de execução do Slump Test	41
Figura 14 - Resultados Slump Test Formulação 2 a) e Formulação 3 b)	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença entre pavimento de concreto convencional e CCR.....	23
Tabela 2 - Benefícios e limitações do CCR.....	24
Tabela 3 - Composição química de Cinzas de Madeira	29
Tabela 4 - Composição do Cimento Portland - CP V ARI.....	31
Tabela 5 - Massa específica do resíduo	37
Tabela 6 - Absorção de água do resíduo.....	38
Tabela 7 - Ensaio de granulometria do resíduo	38
Tabela 8 - Tabela de correção de acordo com a relação altura/diâmetro do CP	42
Tabela 9 - Características físicas do agregado graúdo	46
Tabela 10 - Dosagem dos materiais para o concreto	46
Tabela 11 - Resistência à compressão do concreto aos 7 dias.....	47
Tabela 12 - Características físicas dos corpos de prova	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre pavimento rígido e flexível.....	21
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2 - Curva de composição granulométrica do agregado miúdo	44
Gráfico 3 - Curva de composição granulométrica do agregado graúdo	45
Gráfico 4 - Resistência à compressão simples aos 7 dias.....	48
Gráfico 5 - Densidade aparente	49
Gráfico 6 - Absorção de água	50
Gráfico 7 - Porosidade aberta	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CM - Cinzas de Madeira

CCR - Concreto Compactado com Rolo

tep - tonelada equivalente de petróleo

CA - Concreto Armado

TSD - Tratamentos Superficiais Duplos

CBUQ - Concreto Betuminosos Usinados a Quente

CCP - Concreto de Cimento Portland

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

°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^3 - Grama por centímetro cúbico

h – Hora

kg/m^3 – 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

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 MALHA RODOVIÁRIA	14
2.2 PAVIMENTAÇÃO	16
2.2.1 Subleito	17
2.2.2 Regularização do subleito	17
2.2.3 Reforço do subleito	18
2.2.4 Sub-base.....	18
2.2.5 Base	18
2.2.6 Revestimento	19
2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS	19
2.3.1 Pavimentos flexíveis.....	19
2.3.2 Pavimento rígido.....	20
2.4 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO.....	22
2.4.1 Requisitos para aplicação do CCR como sub-base para pavimento rodoviário	24
2.5 ADIÇÃO MINERAL	24
2.5.1 Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos de madeira	26
2.5.2 Cinza de madeira	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	30
3.1.1 Cimento	30
3.1.2 Agregados miúdo e graúdo	31
3.1.3 Água	31
3.1.4 Cinza de Madeira	31
3.2 MÉTODOS.....	32
3.2.1 Caracterização dos agregados	32
3.2.2 Caracterização do resíduo	37
3.2.3 Preparação do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	38
3.2.4 Ensaio de Consistência – Slump Test.....	40

3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	41
3.2.6 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	44
4.1.1 Agregado Miúdo	44
4.1.2 Agregado Graúdo	45
4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO	46
4.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova	46
4.2.2 Ensaio de consistência	46
4.2.3 Ensaio de resistência à compressão axial simples.....	47
4.2.4 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um vasto território, considerado um dos maiores do mundo, com cerca de 8.514.876 km², porém, apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional possui pavimentação (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, 2016). A expansão da malha rodoviária pavimentada também não acompanha o ritmo de crescimento da frota de veículos e no período de julho de 2006 a junho de 2016, a frota cresceu 110,4%, enquanto a extensão das rodovias federais cresceu somente 11,7% (CNT, 2016).

O transporte de cargas e passageiros é constituído majoritariamente pelo modal rodoviário, sendo assim o pavimento torna-se parcela representativa da infraestrutura do transporte. A economia e desenvolvimento do país necessita que a expansão da malha rodoviária pavimentada acompanhe o crescimento da frota de veículos e que as rodovias suportem a demanda de transporte (CNT, 2016).

De acordo com Bernardes (2018), a expansão constante de produção, somada ao crescimento acelerado da população implica, entre outros fatores, na necessidade de expansão das rodovias como um meio para melhor locomoção dos automóveis, tanto para o transporte de cargas quanto de pessoas.

Devido ao alto volume de estradas a ser pavimentado no Brasil, abre-se espaço para tecnologias que busquem durabilidade, economia, segurança e se possível, associadas a uma redução de impactos ambientais. Desta forma, o Concreto Compactado com Rolo (CCR) torna-se uma tecnologia favorável à pesquisa, visto que, por ser um material rígido, absorve e distribui melhor o carregamento imposto pelo tráfego, além de possuir maior resistência, durabilidade e baixo índice de deformação (SILVA, 2006).

Atualmente o Brasil é o maior cultivador de árvores plantadas no mundo para fins de processamento industrial, área a qual tem um alcance de 7,84 milhões de hectares, tornando-se uma expressiva geradora de resíduos, desde o processo de extração até a queima em caldeiras, chegando a produzir cerca de 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano (LOUZADA JÚNIOR et al., 2017).

Uma das formas de diminuir o impacto ambiental gerado pelo setor industrial é a reutilização dos resíduos gerados pelo mesmo. Dentre eles a cinza da madeira, gerada pela combustão incompleta da madeira, de acordo com Bennack (2016), é possível de reutilização no pavimento.

Em se tratando de pavimentação, é possível classificar os pavimentos em dois tipos, o rígido e o flexível (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2012). Um concreto muito utilizado no tipo rígido é o Concreto Compactado com Rolo (CCR), cujos materiais componentes são os mesmos utilizados no concreto convencional (ARAUJO *et al.*, 2000). Por ser um material rígido, absorve e distribui melhor o carregamento imposto pelo tráfego, além de possuir maior resistência, durabilidade e baixo índice de deformação (SILVA, 2006).

O presente trabalho será dedicado ao estudo da cinza de madeira como um substituto sustentável ao agregado miúdo, adicionando-a ao CCR, e assim verificar seu desempenho em relação à resistência à compressão assim como suas características físicas.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar em laboratório o comportamento mecânico do Concreto Compactado com Rolo a partir da substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a dosagem referência do CCR;
- Estabelecer os percentuais de substituição do agregado miúdo pela cinza de madeira;
- Analisar o comportamento mecânico através dos ensaios de compressão axial dos corpos de prova aos 7 dias;
- Verificar a possibilidade de utilização do CCR como sub-base de pavimento rodoviário através das análises da resistência à compressão;
- Verificar absorção da água e porosidade aberta e densidade aparente nos corpos de prova.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas informações relacionadas à atual situação da malha rodoviária brasileira e possíveis causas para isso, assim como conceitos e características de pavimentos rígidos e flexíveis. Também serão apresentadas informações sobre o CCR, adições minerais, sustentabilidade e cinza de madeira.

2.1 MALHA RODOVIÁRIA

Dentre as modalidades de transporte, o tipo rodoviário ocupa um papel importante e de destaque no Brasil, sendo responsável por 65% da movimentação de cargas, levando em consideração o ano de 2015 (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA – Minfra, 2019).

Em 2019 foram analisados pela CNT 108.863 km da malha federal pavimentada e os principais trechos estaduais, cujo resultado apontou que 59% apresenta algum tipo de irregularidade.

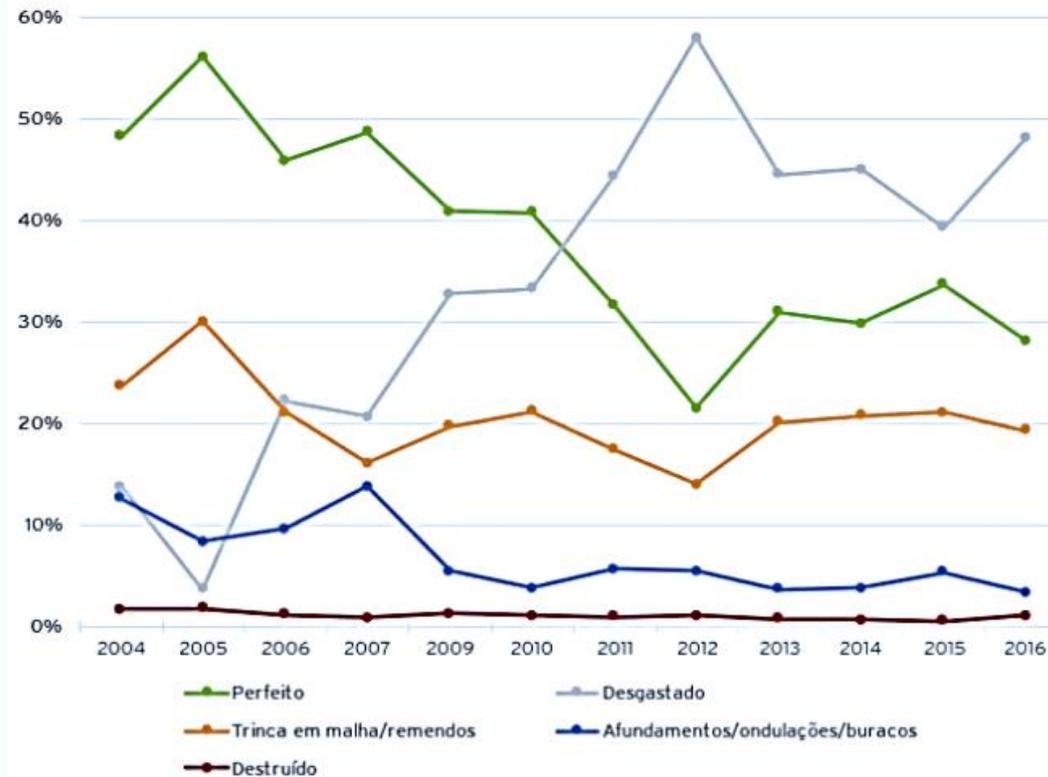
A densidade da malha rodoviária pavimentada no país ainda é muito baixa, mesmo sendo o modal de transporte com maior demanda (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2014). Dados divulgados pelo anuário CNT do Transporte em 2018 apontam que o transporte rodoviário brasileiro enfrenta graves problemas com a baixa qualidade de infraestrutura.

A malha rodoviária federal do Brasil possui atualmente uma extensão em torno de 76 mil km, dos quais 65 mil km são rodovias pavimentadas e o restante, 10,4 mil km, rodovias não pavimentadas (MInfra, 2019). Sua administração é feita pelo órgão de autarquia federal, vinculado ao Ministério da Infraestrutura, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o qual atua como órgão gestor e executor dos empreendimentos, através de construção de novas vias, pavimentação, dentre outras atribuições.

O cenário caótico de degradação precoce do pavimento rodoviário faz com que aumente ainda mais a necessidade de busca por novas tecnologias na pavimentação, que garantam estruturas de melhor qualidade para os usuários (SILVA, 2006).

É possível observar na Figura 1 que os pavimentos que se encontravam em perfeito estado estão em decadência, mudando gradativamente de categoria tornando-se desgastados.

Figura 1 - Evolução da condição da superfície do pavimento nas Rodovias Públicas (em%)



Fonte: CNT, 2017.

Essa precariedade é causada, em parte, por falta de manutenção preventiva e principalmente pela forma como são dimensionados e construídos os pavimentos. De acordo com Holanda (2010), os métodos de dimensionamento utilizados, basicamente, são o empírico e o mecanístico-empírico, os quais determinam a espessura ideal e o material constituinte de cada camada, de forma que suporte adequadamente os esforços provenientes do tráfego.

Bernucci et al., (2006) afirma que os métodos empíricos baseiam-se em fórmulas e em experiências previamente obtidas em campo, resultando em limitações devido à aplicabilidade apenas em climas e em condições semelhantes às estudadas. Já os métodos mecanístico-empíricos trabalham com parâmetros da mecânica dos pavimentos concebidos em modelos teóricos e os combinam com os resultados obtidos em laboratórios e testes realizados em pistas reais, gerando uma previsão mais aproximada do comportamento real (BERNUCCI et al., 2006).

No Brasil, para pavimentos flexíveis, é empregado um método de dimensionamento criado em 1966, baseado no California Bearing Ratio (CBR), atualizado em 2006. Esse método essencialmente empírico utiliza parâmetros gerais para realizar o dimensionamento

das camadas, o que traduz num método falho para o Brasil que é um país de grande extensão e com climas adversos (BERNUCCI et al., 2006). Já para pavimentos rígidos utiliza-se um método teórico desenvolvido pela Portland Cement Association (PCA) em 1966 e introduzido com adaptações pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o mesmo baseia-se em fundamentos teóricos propostos por Westergaard que permite com o auxílio de ábacos e assim definir as tensões desenvolvidas nos pavimentos de concreto através dos eixos solicitantes (HOLANDA 2010).

Segundo Silva (2006), a degradação precoce do pavimento acentua a necessidade de investimento em novas pesquisas de dimensionamento e materiais que resultem em estruturas mais fortes, no intuito de reduzir o excesso de trincas e deformações precoces dos pavimentos.

2.2 PAVIMENTAÇÃO

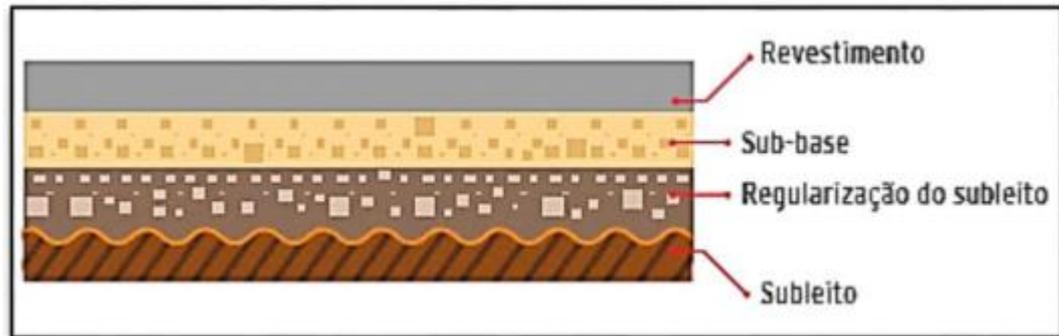
Segundo o DNIT (2006), o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre a terraplenagem. Meio técnico e econômico para a resistência aos esforços oriundos do tráfego e assim propicia melhores condições de rolamento dos veículos (DNIT, 2006).

Segundo Balbo (2007), pavimento é toda a estrutura existente nas ruas, estradas e rodovias, espaço no qual as pessoas locomovem-se a pé ou através de meios de transporte. Em todos esses locais, entretanto, onde há movimentação, seja de pessoas ou veículos, haverá esforço vertical realizado pelo peso dos mesmos, esforço o qual é denominado de solicitação. Essa solicitação será repassada para o pavimento, que, por sua vez, deverá ter a devida estrutura para recebê-la e resisti-la.

Para que tais requisitos de resistência sejam cumpridos, de acordo com Balbo (2007), estudos do solo e das solicitações devem ser realizados para que a obra de pavimentação seja adequada para tal, tendo uma maior durabilidade assim como conforto e segurança para seus usuários.

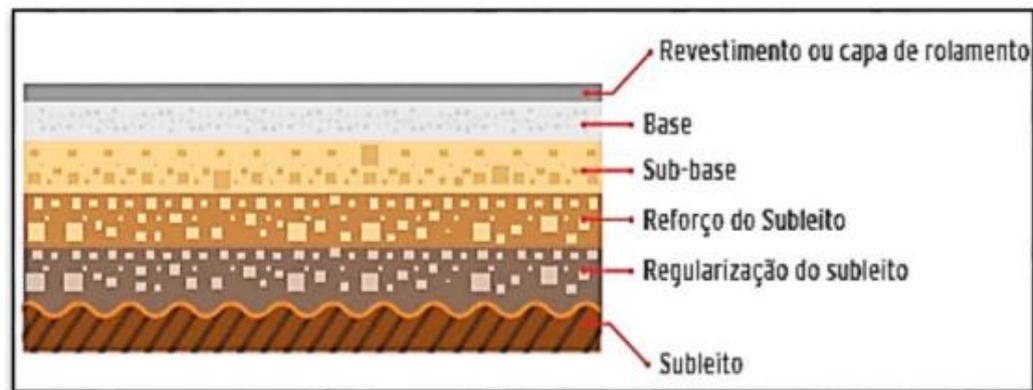
Bernucci *et al.* (2006) classifica os pavimentos como rígidos (Figura 2) e como flexíveis (Figura 3).

Figura 2 - Esquema da seção transversal do pavimento rígido



Fonte: CNT, 2017.

Figura 3 - Esquema da seção transversal do pavimento flexível



Fonte: CNT, 2017.

2.2.1 Subleito

Segundo Balbo (2007), o subleito pode ser também considerado a fundação do pavimento, sendo constituído de material natural consolidado e compactado e os esforços impostos sobre sua superfície serão aliviados em sua profundidade.

É um semi-espaço teoricamente infinito onde são assentadas as outras camadas finitas que compõem o pavimento (DNIT, 2006).

2.2.2 Regularização do subleito

A regularização do subleito não é definida como uma camada propriamente dita, pode ser denominada também como preparo de subleito, tendo como função nivelar o terreno de fundação tanto transversalmente quanto longitudinalmente, além de estabelecer as

características geométricas necessárias (inclinação transversal) do pavimento finalizado (CNT, 2017).

2.2.3 Reforço do subleito

Camada executada quando o terreno de fundação regularizado é composto por um material de baixa resistência ou quando o pavimento é submetido a cargas muito elevadas. Desta forma, sua função é resistir e distribuir os esforços verticais para o subleito, sendo utilizados materiais que atendam as especificações do Manual de Pavimentação do DNIT, possuindo no mínimo características superiores ao material que compõem o subleito e inferiores ao material de sub-base (CNT, 2017).

2.2.4 Sub-base

É a camada que dissipa as tensões recebidas para as camadas inferiores do pavimento, sendo complementar à base quando não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito (BALBO, 2007).

A CNT (2017) define a sub-base como sendo uma “camada complementar à base e executada por circunstâncias técnico-econômicas quando a camada da base exigida for muito espessa”.

O material utilizado nesta camada é escolhido de acordo com as necessidades de projeto, em função da disponibilidade de material na região ou ainda devido ao tipo de revestimento que será aplicado. Alguns materiais utilizados nessa camada são: solo estabilizado naturalmente ou quimicamente, macadame, concreto compactado com rolo, solo-brita, brita graduada, brita graduada com cimento, entre outros (DNIT, 2006).

2.2.5 Base

É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços consequentes do tráfego sobre a qual está sendo construído o pavimento (Manual de Pavimentação – DNIT, 2006).

Balbo (2007) afirma que a base é a camada de maior importância estruturalmente falando, pois localiza-se logo abaixo do revestimento do pavimento, sendo então responsável pelo suporte estrutural inicial, tendo então que dissipar as cargas para as camadas inferiores.

2.2.6 Revestimento

O revestimento é a última camada do pavimento, o qual então recebe o primeiro impacto sofrido na superfície, por esse motivo deve fornecer ao usuário conforto e segurança, assim como também resistir aos esforços e desgastes provenientes do tráfego.

De acordo com SENÇO (2017) é a camada tanto quanto possível impermeável, destinada a melhorar a superfície de rolamento, aumentando a durabilidade da estrutura.

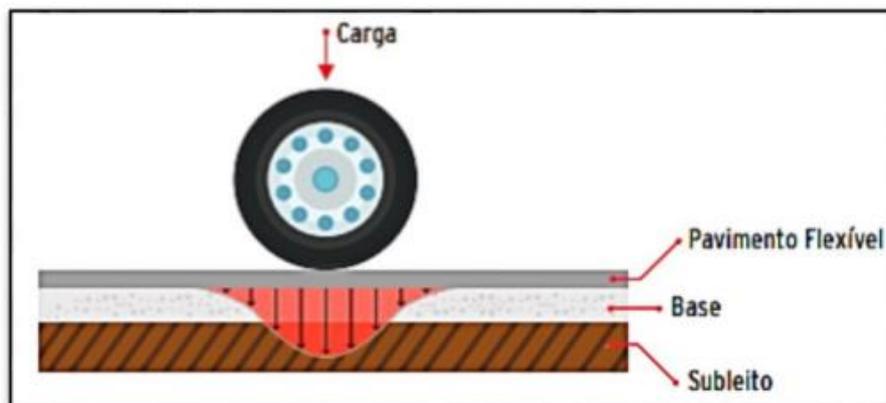
2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS

Bernucci *et al.* (2006), afirma que de acordo com os tipos de materiais empregados em cada camada e suas características tecnológicas, os pavimentos podem ser classificados como flexíveis ou rígidos. Entretanto é importante ressaltar que existem pavimentos híbridos, mais conhecidos como semirrígidos ou semi-flexíveis, nesses são utilizadas camadas de base ou sub-base de materiais cimentícios (DNIT, 2006).

2.3.1 Pavimentos flexíveis

De acordo com o DNIT (2006), pavimento flexível é aquele em que todas as camadas do pavimento sofrem deformação elástica significativa sob o esforço que está sendo solicitado, e, assim a carga passa a ser distribuída em parcelas aproximadamente iguais entre as camadas do pavimento, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Deformação elástica devido a carga no pavimento flexível



Fonte: CNT, 2017.

Uma estrutura de pavimento flexível é composta geralmente de diversas camadas de materiais que podem absorver esses esforços na estrutura (ALBINO; VISSOTTO, 2013).

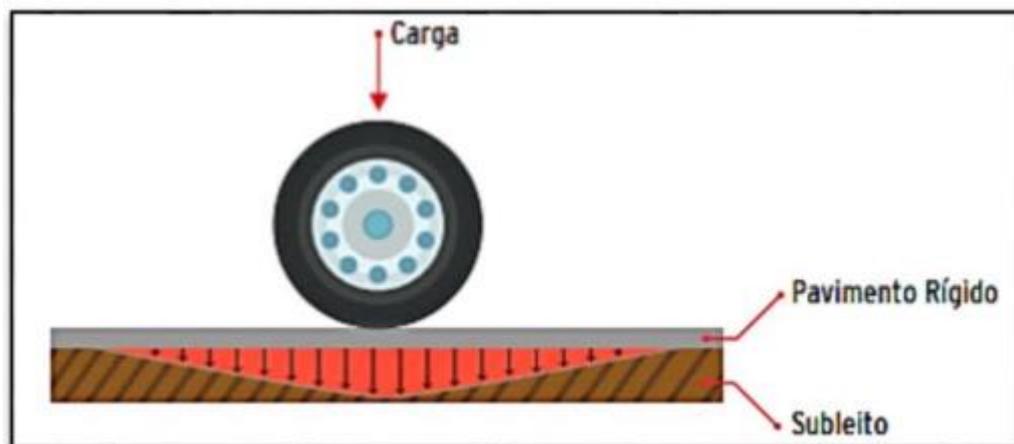
Os materiais constituintes do pavimento flexível são: material asfáltico (aglutinantes), agregado graúdo (brita ou seixo rolado) e agregado miúdo (areia ou pó-de-pedra) (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008).

2.3.2 Pavimento rígido

De acordo com o DNIT (2006), pavimento rígido é caracterizado por ter uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, e, portanto, absorve todas, ou quase todas as tensões vindas do carregamento aplicado.

Os pavimentos rígidos possuem elevada rigidez absorvendo e distribuindo praticamente todo o carregamento imposto pelo tráfego. Conforme representação esquemática (Figura 5), a distribuição dos esforços não se concentra apenas no ponto de aplicação da carga e sim em toda a extensão da placa (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Figura 5 - Deformação devido a carga no pavimento rígido



Fonte: CNT, 2017.

Esse tipo de pavimento é mais rígido devido ao elevado módulo de Elasticidade do CPC - Cimento Portland Comum (ALBINO; VISSOTTO, 2013).

Os materiais constituintes do pavimento rígido: cimento portland (comum), agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), água (tratada), aditivos químicos (plastificantes), fibras (plásticas ou aço), selante de juntas (moldado), material de enchimento de juntas (fibras ou borracha) e aço (CA-50, 60 e 25) (BIANCHI *et al.*, 2008).

Segundo a CNT (2017), a camada de base e revestimento tornam-se uma única camada podendo ser classificadas como:

- Pavimentação de concreto simples: pavimento de concreto Portland, em que as tensões são combatidas somente pelo próprio concreto;
- Pavimentação do tipo whitetopping: pavimento de concreto sobreposto a um pavimento flexível já existente. Usado normalmente para recuperação de estradas.
- Pavimentação estruturalmente armada: pavimentação com concreto armado, ou seja, utilizam-se barras de aço soltas ou em malha, que têm a função de controlar a propagação de fissuras no pavimento;
- Pavimentação em concreto rolado: Também chamada de concreto compactado com rolo, indicada para locais onde há circulação de veículos em baixa velocidade ou em sub-bases.
- Pavimentação com peças em concreto pré-moldado: construída a partir de peças pré-moldadas, adequada para estacionamento, vias de acesso e desvios com tráfego leve.

O Quadro 1 apresenta um comparativo entre as características dos pavimentos flexíveis e rígidos.

Quadro 1 - Comparativo entre pavimento rígido e flexível

	Pavimentos flexíveis	Pavimentos rígidos
Investimento inicial	Varia de acordo com os materiais utilizados e os valores dos insumos por região	Investimento inicial varia, mas pode-se considerar que esse valor seja em média 30% maior em relação ao pavimento flexível
Vida útil (com manutenção)	8 a 12 anos	25 a 30 anos
Manutenção	frequente e complexa	Pouca necessidade de manutenção e ações mais simples
Espessura/estruturação	Estrutura mais espessa com camadas múltiplas	Menos camadas
Distribuição das tensões	A carga é distribuída a todas as camadas, que sofrem deformação elástica significativas	Placa absorve a maior parte das tensões e as distribui sobre uma área relativamente maior
Materiais utilizados	O asfalto é derivado do petróleo normalmente misturado a quente, consumindo combustível	O concreto é feito de materiais locais, misturado a frio, consumindo geralmente, energia elétrica
Reação com produtos químicos	Suscetíveis a alterações químicas irreversíveis	Pouco suscetíveis a reações químicas e à contaminação
Aderência das demarcações (sinalização horizontal)	De textura mais rugosa, apresenta melhor aderência das demarcações da pista	Devido ao seu baixo índice de porosidade, apresenta baixa aderência das demarcações
Difusão de luz	Menor índice de reflexão de luz	Coloração clara, apresentando melhor capacidade de difusão de luz (refletividade)
Drenagem	Absorve a água com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos (inclinação lateral)	Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial
Segurança quanto à derrapagem	Superfície escorregadia quando molhada	Fornecer boa aderência do pneu, devido à textura da superfície.

Fonte: Adaptado de CNT, 2017.

2.4 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Concreto compactado com rolo (CCR) é utilizado principalmente para a execução da sub-base de um pavimento rígido, o qual é composto por cimento Portland e compactado por meio de rolos compressores vibratórios (DNIT, 2013). É um concreto seco, com consistência e trabalhabilidade tal que permitem sua compactação através de compressores (AOKI, 2009).

De acordo com Andrade (1997, p. 66 apud Silva, 2006, p. 29), “CCR é um concreto de consistência seca, não mensurável pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (slump zero), e se diferencia do concreto convencional principalmente no que diz respeito à trabalhabilidade e consistência”.

Segundo o DNIT 056 (2013), define-se concreto rolado para sub-base de pavimento rígido como um concreto simples com baixo consumo de cimento e consistência seca, fato este que permite a compactação com rolos compressores ou similares. Para que ocorra a consolidação adequada do CCR, o mesmo deve ser suficientemente “seco” a fim de suportar o peso do equipamento de adensamento e devidamente úmido no intuito de facilitar a adequada distribuição da pasta ligante na massa de concreto durante o processo de mistura, espalhamento e compactação, resultando em um concreto com características semelhantes às obtidas em concretos convencionais (SILVA, 2006).

O concreto convencional é composto por uma mistura de água, agregado miúdo, agregado graúdo e materiais cimentícios. Para a execução do CCR, os materiais e equipamentos utilizados são os mesmos da pavimentação tradicional, porém em diferentes proporções (ARAÚJO *et al.*, 2016).

A maior diferença entre as misturas do concreto compactado com rolo e as misturas convencionais é que o CCR possui uma porcentagem maior de agregados miúdos, o que permite uma maior consolidação (HARRINGTON *et al.*, 2010). A tabela 1 a seguir apresenta as principais diferenças entre o CCR e o concreto convencional aplicado à pavimentação.

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

	Pavimento em Concreto	Pavimento em CCR
Proporção 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 menores teores de cimento e água.
Trabalhabilidade	Mistura é fluida.	A mistura tem consistência densa.
Acabamento	Mecanicamente texturizado.	Tipicamente apresenta textura similar ao asfalto, mas em alguns casos a textura pode assemelhar-se ao concreto convencional.
Fratura, transferência de carga e esforço	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).

Outra diferença característica entre os dois tipos de concreto é que para o CCR não há exigências rigorosas quanto à qualidade do agregado graúdo e nem a granulometria, fazendo com que o mesmo seja aplicado em casos de menor complexidade (DNIT, 2004).

De acordo com Aoki (2009) a execução do CCR deve ser cuidadosa, o espalhamento pode ser manual ou com equipamentos como a motoniveladora, e a camada de espalhamento tem altura entre 20 a 30% maior que a camada final compactada de projeto.

Obtendo densidade adequada durante o processo de fabricação do CCR e dependendo do equipamento específico de mistura utilizado, a compactação do concreto por rolos pode resultar em uma redução de 5 a 20% em volume (HARRINGTON *et al.*, 2010). De acordo com USACE (2010), uma redução de custo de 20 a 50%, justificada pela escolha do agregado e cimento. USACE (2010) ainda afirma que também há a redução em meses no tempo de construção, a qual se justifica o seu uso e também um aumento da produtividade no processo.

A tabela 2 traz os benefícios e limitações da aplicação do CCR.

Tabela 2 - Benefícios e limitações do CCR

Benefícios	Limitações
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 à 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.

O concreto compactado com rolo possui alta densidade e durabilidade, essas características combinadas à velocidade de construção e economia fazem do CCR uma ótima alternativa para construção de áreas de armazenamento, instalações portuárias, intermodais, ruas e estradas (HARRINGTON *et al.*, 2010).

2.4.1 Requisitos para aplicação do CCR como sub-base para pavimento rodoviário

De acordo com Norma DNIT 056/2013-ES a execução de sub-base de concreto de cimento Portland Compactado com Rolo deve apresentar resistência característica à compressão (fck) aos 7 dias. Este ensaio deve ser realizado em corpos de prova que deverão resultar em uma resistência maior que 5,0 MPa, de acordo com a norma NBR-5739:2018.

O consumo de cimento para a execução de tais corpos de prova deve estar dentro do intervalo de 80 kg/m³ a 120 kg/m³ (DNIT, 2013).

2.5 ADIÇÃO MINERAL

Segundo Albuquerque (2014), a adição mineral consiste em materiais inorgânicos, compostos silico-cálcico-aluminosos, que podem substituir parte do cimento. O termo adição

mineral refere-se a qualquer material que não seja água, agregados e cimento que será adicionado à massa do concreto antes ou durante a mistura (MALHOTRA, et al., 1996).

De acordo com Fonseca (2010) as adições são utilizadas com o intuito de somar em alguns casos substituir, em partes, a matéria-prima cimento, por terem propriedades semelhantes ao mesmo, sem alterar, então, a sua proporção na composição do concreto. Ainda segundo o autor, é mencionado que as adições minerais promovem melhorias na durabilidade e resistência do concreto, entre alguns desses benefícios estão: redução da porosidade capilar; diminuição das fissuras de origem térmica; melhoria na resistência a ataque por sulfatos, entre outros.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), adições são utilizadas no objetivo de somar ou substituir, parcialmente, o cimento ou o agregado variando de acordo com as propriedades da adição. As adições minerais mais utilizadas na construção civil são resíduos oriundos da indústria, que seriam descartados em aterros ou em locais inapropriados podendo vir a contaminar o solo ou a água (DAL MOLIN, 2005). Sendo assim seu reaproveitamento torna-se vantajoso tanto em relação a custos quanto à sustentabilidade ambiental. De acordo com Malhotra e Mehta (1996), as adições podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Benefícios na trabalhabilidade: a adição de partículas finas tende a aumentar a quantidade de água necessária, entretanto gera uma consistência melhor do concreto, fato esse que pode melhorar a resistência, reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência a ataques químicos;
- Benefícios econômicos: Em alguns casos podem ser utilizados em substituição a uma parte do cimento Portland, constituinte mais caro presente no concreto, ou em substituição do agregado, reduzindo os custos da obra;
- Benefícios ecológicos: os resíduos utilizados como adição possuem constituintes químicos poluentes, tóxicos e patogênicos, que são nocivos ao meio ambiente se descartados de maneira inadequada.

De acordo com Dal Molin (2005), as adições minerais podem ser classificadas de acordo com suas características físico-químicas, podendo ser divididas em três grupos:

- Material cimentante: Dispensa a necessidade do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes. Entretanto, não é utilizado para fins estruturais, pois sua auto-hidratação é lenta, formando uma quantidade de produtos cimentantes insuficientes;

- Materiais pozolânicos: Possui pouco ou nenhum valor cimentício, pois a pozolana é um material silicioso ou sílico-aluminoso. No entanto, é finamente dividido e empregado na presença de umidade, pois reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos que possuem propriedade cimentícias;
- Material não reativo: É o caso do fíler, que não possui atividade química quando seu diâmetro está próximo ao do cimento. Tem por finalidade preencher os vazios entre as partículas de cimento, resultado do efeito físico de empacotamento granulométrico, o que aumenta a compacidade da mistura e conseqüentemente refinamento dos poros.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), o uso de materiais pozolânicos e cimentícios nas indústrias do cimento e do concreto tem crescido exponencialmente durante os últimos cinquenta anos, podendo ter um alcance ainda maior no futuro.

Dal Molin (2005) afirma que os resíduos provenientes das indústrias, que, por muitas vezes são descartados em grandes volumes em locais não apropriados, são considerados as adições minerais mais utilizadas no ramo da construção civil, contribuindo para o meio ambiente.

2.5.1 Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos de madeira

Sustentabilidade pode ser definida como a capacidade do ser humano de interagir com o meio ambiente, tomando medidas para sua preservação e assim não comprometendo os espaços das gerações futuras (LEITE, 2013).

Porém, durante décadas, o modelo de desenvolvimento tradicionalmente adotado pelos países convergia para políticas de extrativismos de recursos naturais, preocupando-se apenas com os benefícios sociais e econômicos gerados a partir desses. Entretanto, atualmente torna-se necessário adotar modelos alternativos de desenvolvimento com o objetivo de reduzir o impacto gerado pelas extrações dos recursos naturais e adotando assim um novo modelo denominado como desenvolvimento sustentável (CABRAL, 2007).

Segundo Mehta (2001), entre as alternativas possíveis para destinação de resíduos, os aterros são os mais utilizados. A decomposição em aterros causa problemas ao meio ambiente a médio e longo prazo, dependendo do tipo de resíduo depositado no mesmo. Novas pesquisas propõem possíveis soluções para um desenvolvimento mais sustentável, encontrando meios de reutilizar os resíduos sólidos dentro da engenharia. Uma possível alternativa seria a adição

do resíduo em substituição aos agregados convencionais, propondo uma destinação muito mais nobre ao resíduo do que simplesmente depositá-lo ao meio ambiente (MODRO et al., 2009).

De acordo com Leite (2013), em termos de pavimentação asfáltica, a preservação ambiental impacta em diversos setores, como saúde, segurança, conforto, ruído, durabilidade, normalização, contratos ecológicos e sua reciclagem, empregando rejeitos e agregados alternativos.

No contexto global, o Brasil exerce papel significativo no cultivo de árvores com fins de processamento industrial, em 2016 cerca de 7,84 milhões de hectares brasileiros estavam ocupados por árvores com essa destinação, número este que aumenta a cada ano (LOUZADA JUNIOR et al., 2017). A geração de resíduos ocorre ao longo de toda a cadeia produtiva da madeira, conforme apresentado na Figura 6. Os dejetos são gerados a partir de atividades florestais ou industriais, e possuem diversas formas e tamanhos.

Figura 6 - Diversos tipos de resíduos da madeira



Fonte: Revista Saúde e Meio Ambiente, 2017.

A utilização de agregados alternativos, como a cinza de madeira, contribui então para a preservação do meio ambiente, pois a mesma é considerada um passivo ambiental e será descartada por não ter mais utilidade (FILHO, 2015).

2.5.2 Cinza de madeira

De acordo com John (2003), cinzas, de forma geral, podem ser utilizadas como adição mineral seguindo alguns critérios básicos, tais como: ser de origem industrial ou vegetal, ser predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada.

Segundo Fonseca (2010), em função de sua granulometria e características mineralógicas, a cinza volante não necessita de nenhum processo de beneficiamento antes de ser utilizada como adição mineral ao concreto.

De acordo com Cheah e Ramli (2011), a quantidade e a qualidade de cinzas de madeira são dependentes de vários fatores, como a temperatura de combustão da biomassa da madeira e a espécie da mesma, a partir da qual os combustíveis da biomassa de madeira foram obtidos e os tipos de tecnologia de combustão utilizados.

Ferriz-Papi (2015) afirma que a existência de resíduos da madeira traz a possibilidade de sua valorização através da sua incineração, já que o mesmo seria descartado gerando malefícios para o meio ambiente. Então, de acordo com Ferriz-Papi (2015), é possível utilizar a cinza da madeira como uma adição ao concreto, reduzindo assim a quantidade de cimento utilizado.

Siddique (2012) observou a influência da cinza de madeira em propriedades como absorção da água, resistência à compressão, à tração e à flexão, resistência ao congelamento e descongelamento, retração do concreto e seu comportamento referente à lixiviação.

De acordo com Ferriz-Papi (2015), é de extrema importância caracterizar essas cinzas, já que nem todas têm a mesma composição, resultando em desempenhos diferentes em cada caso. O mesmo afirma que a maior influência nessa composição se deva à temperatura de calcinação, o tipo de forno e as diferentes espécies queimadas:

- Quanto maior a temperatura, menor a quantidade de cinzas. Entre 538°C e 1093°C as diferenças podem chegar até 45% nas cinzas produzidas, o conteúdo de carbono diminui e uma quantidade maior de óxidos é obtida, como CaO;

- A tecnologia de combustão depende do tipo de forno e da incineração. Uma fornalha normal produz cinzas mais espessas que tendem a ser colocadas na parte inferior da câmara de combustão;

- As espécies queimadas alteram significativamente a quantidade final de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e CaO. Por exemplo, o conteúdo de óxido de silício é bastante variável, o que influenciará substancialmente nas características pozolânicas das cinzas.

A tabela 3 mostra as diferentes composições químicas apontadas por diferentes tipos de autores.

Tabela 3 - Composição química de Cinzas de Madeira

Autores	Compostos químicos							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Elinwa e Mahmood (2002)	67,20	4,09	2,26	9,98	5,80	-	0,08	0,48
Udoeyo e Dashibil (2002)	78,92	0,89	0,85	0,58	0,96	-		-
Elinwa e Ejeh (2004)	67,20	4,09	2,26	9,98	5,80	-		0,48
Abdullahi (2006)	31,80	28,0	2,34	10,53	9,32	0,38		-
Cheah e Ramli (2012)	28,00	4,10	2,50	39,00	10,00	7,40	1,00	3,90

Fonte: Elinwa e Mahmood; Udoeyo e Dashibil; Elinwa e Ejeh; Abdullahi; Cheah e Ramli.

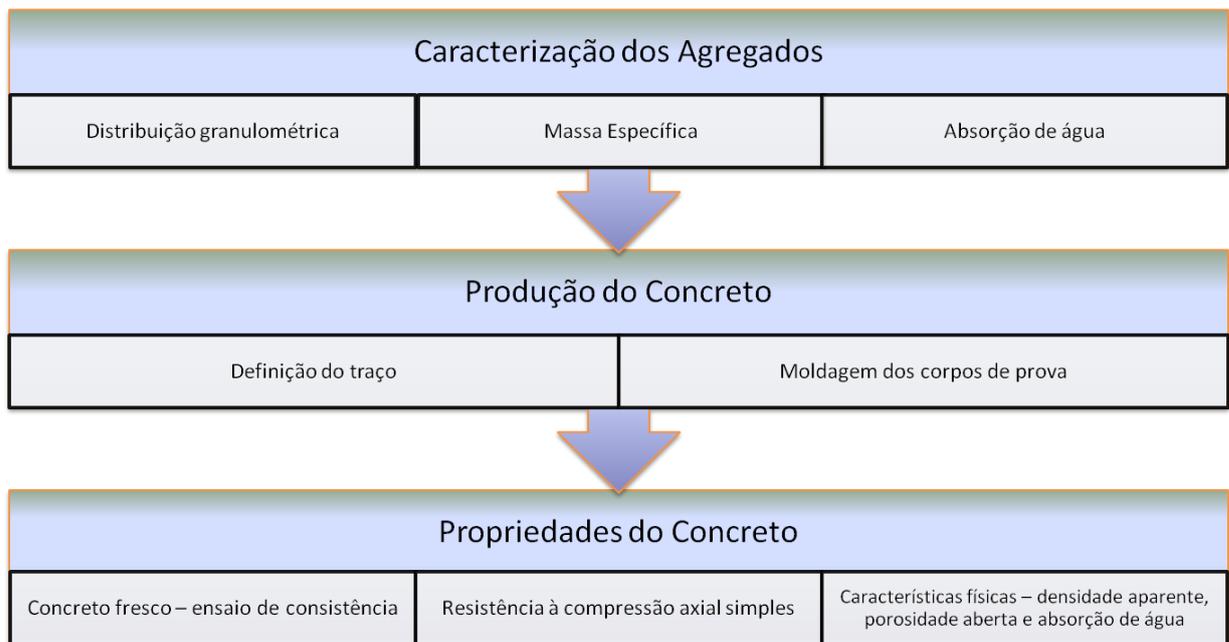
Uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pela geração deste resíduo é a sua incorporação em produtos cimentícios, área que consome significativa quantidade de matéria-prima e que busca obter melhores resultados relacionados a resistência, durabilidade e custo-benefício.

Segundo Udoeyo *et al.* (2006), adicionando cinza ao cimento e mantendo a relação água/cimento, evidencia-se a redução da trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco, na medida em que a proporção de cinzas aumenta. O emprego da mesma influência no consumo de água, trabalhabilidade, densidade aparente, absorção de água, porosidade aberta, e resistência do concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão detalhados os materiais e os ensaios realizados no desenvolvimento experimental do trabalho. A Figura 7 apresenta o fluxograma das etapas que serão desenvolvidas neste trabalho.

Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autora, 2020.

3.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO

As matérias primas utilizadas para a produção do CCR são: cimento, agregados, água e resíduo de cinza de madeira.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na produção do CCR é o Cimento Portland, do tipo CP V ARI, de Alta Resistência Inicial, do segmento de cimentos para obras especiais, da marca Votoran. As características técnicas fornecidas pelo fabricante se encontram na tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Composição do Cimento Portland - CP V ARI

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

Fonte: Adaptada de ABCP, 2015.

Este cimento possui como característica marcante atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação.

3.1.2 Agregados miúdo e graúdo

Segundo a norma DNIT 056 (2013), a dimensão máxima característica do agregado no concreto compactado com rolo, não deve exceder 1/3 da espessura da sub-base ou 32mm, desta forma foi utilizada areia média e brita 0. A areia e a brita utilizadas na produção do concreto têm origem na região de Joinville-SC.

3.1.3 Água

A água utilizada na preparação dos corpos de prova deste trabalho foi fornecida pela rede pública de abastecimento de água da cidade de Joinville SC, Companhia Águas de Joinville (CAJ).

3.1.4 Cinza de Madeira

O resíduo (cinza de madeira), gerado a partir da combustão incompleta do Pinus (casca, galhos, folhas e subprodutos madeireiros resultantes do processo de beneficiamento da madeira), é proveniente de uma indústria de painéis e produtos de madeira, localizada em Araucária-PR.

Os materiais utilizados estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - Cimento (a); Cinza de madeira (b); Areia (c) e Brita (d)



Fonte: Autora, 2020.

3.2 MÉTODOS

Os materiais apresentados serão submetidos aos ensaios descritos nesta seção.

3.2.1 Caracterização dos agregados

Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC, campus Joinville.

3.2.1.1 Distribuição granulométrica dos agregados

A granulometria consiste na distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos. É a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência. Sendo assim, determina-se o módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado.

O ensaio de granulometria dos agregados foi realizado seguindo as normas ABNT/NBR NM 248 (2003), ABNT/NBR 7211 (2009) e ABNT/NBR 16312-2 (2015).

Segundo a ABNT/NBR 16312-2, “a areia a ser utilizada no traço de CCR, deve assegurar um mínimo de material fino capaz de garantir a produção de um concreto trabalhável, com boa compacidade e que permita um acabamento adequado”.

Para iniciar os ensaios, os agregados foram secos em estufa a cerca de 105°C. Os materiais foram então divididos em duas amostras de 1 kg de brita zero e em duas amostras de 1 kg de areia, cada conjunto de amostras então foi submetido a dois ensaios, sendo o resultado final sendo a média dos mesmos.

Peneiras com diferentes diâmetros foram utilizadas: 9,50mm; 6,30mm; 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,60mm; 0,30mm; 0,15mm; fundo e tampa. As mesmas foram limpas,

separadas e encaixadas por ordem de abertura de malha, da base até o topo, seguindo as normas NBR NM ISO 3210-2 (1997), NBR NM ISO 2395 (1997) e NBR NM ISO 3310-1 (1997).

Este conjunto de peneiras foi posicionado no eixo central do agitador eletromagnético, conforme abertura de malha. A tampa então foi posicionada e o conjunto foi preso junto aos dispositivos de segurança. As peneiras foram agitadas (mecanicamente) por 10 minutos.

Logo após foi destacada a peneira superior e foi encaixado o fundo, executando então uma agitação manual por dois minutos.

O material passante nesta peneira foi adicionado à peneira seguinte da pilha. Esse procedimento foi então repetido para as demais peneiras.

Foi verificado o peso do material retido em cada peneira, assim como a massa total do conjunto de forma meticulosa, já que o mesmo não deve diferir mais de 0,3% da massa seca da amostra.

O módulo de finura é calculado a partir da soma das porcentagens retidas acumuladas de cada peneira particionado por 100. O diâmetro máximo do agregado é obtido em função da abertura da peneira na qual a porcentagem retida acumulada for inferior ou igual a 5% e superior a 5% na peneira imediatamente abaixo. A Figura 9 ilustra as peneiras utilizadas para o ensaio.

Figura 9 - Ensaio de granulometria



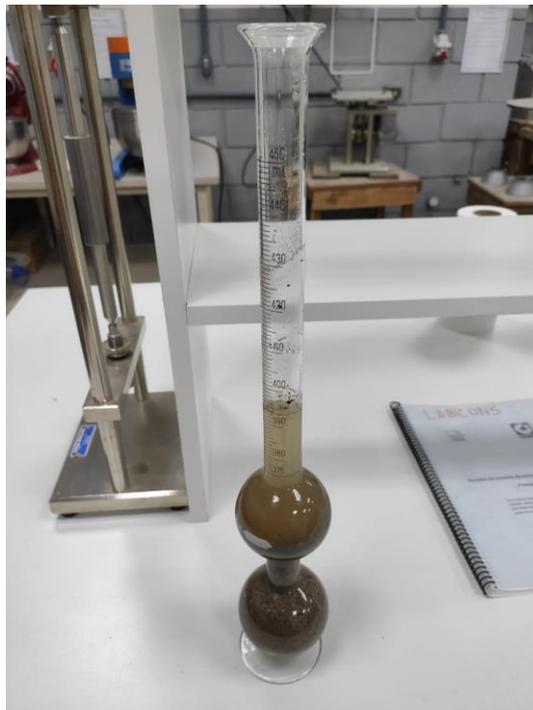
Fonte: Autora, 2020.

3.2.1.2 Determinação da massa específica e absorção de água do agregado miúdo

A massa específica de um material granular é a relação entre a massa do agregado seco e o volume dos grãos, sem levar em consideração os poros permeáveis à água (BENNACK, 2016).

A determinação da massa específica do agregado miúdo foi executada de acordo com a norma ABNT/NBR 9775 (2011), utilizando uma balança com sensibilidade 0,01 g e frasco Chapman (Figura 10) com capacidade de 450 ml, composto por dois bulbos e um gargalo graduado.

Figura 10 - Frasco Chapman



Fonte: Autora, 2020.

Foram então separadas duas amostras de 500 g do agregado miúdo, seguindo as especificações da NBR NM 26 (2001). As amostras foram secas em estufa a 105°C até obter constância na massa.

O frasco foi preenchido até alcançar 200 cm³ de água e mantido em repouso para que não houvesse água retida nas paredes.

Após o preenchimento do frasco, foi então introduzido, de forma cuidadosa e com o auxílio de um funil, 500 g de agregado miúdo seco, o qual foi agitado para eliminar as bolhas de ar.

A Equação 1 abaixo foi utilizada para obter a massa específica do agregado miúdo.

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

Onde:

γ - massa específica do agregado miúdo (g/cm³);

L – volume do frasco ocupado pelo conjunto água e agregado miúdo (cm³).

Para determinar a absorção de água do agregado miúdo, o frasco Chapman foi preenchido de forma cuidadosa com água até alcançar a marca de 200 cm³ ($V_{\text{água}}$) e mantido em repouso por alguns minutos para que não permanecesse água retida nas paredes. Com o auxílio de um funil, a areia então foi adicionada ao frasco.

A mistura ficou em repouso por 72 horas para garantir a total absorção das partículas, posterior a esse período o volume final foi registrado (V_{final}).

As Equações 2 e 3 abaixo foram utilizadas para determinar a absorção de água, através dos volumes registrados.

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

Onde:

$V_{\text{água,absorvida}}$ – Volume de água absorvida (cm³);

$V_{\text{água}}$ – Volume de água inicialmente adicionado ao frasco (200 cm³);

V_{agregado} – Volume de agregado miúdo (200 cm³);

V_{final} – Volume final (cm³).

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

Onde:

A – Absorção do agregado miúdo (%);

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

$V_{\text{água}}$ – Volume de água inicialmente adicionado ao frasco (200 cm^3);

V_{agregado} – Volume de agregado miúdo (200 cm^3).

3.2.1.3 Determinação de massa específica e absorção de água do agregado graúdo

Para a determinação da massa específica e absorção de água seguiu-se as diretrizes da ABNT/NBR NM 53 (2009).

Uma amostra de 2 kg de brita zero foi separada e posteriormente submersa em água a temperatura ambiente por 24 horas. Após este período, a amostra foi depositada em um cesto vazado e novamente submersa em água e pesada com balança digital de precisão de 0,1 g, deixando registrada a massa do agregado em água (m_a). A amostra então foi superficialmente seca e assim registrando a massa em gramas do agregado saturado com superfície seca (m_s).

Finalmente, a amostra foi seca a 105°C em estufa e pesada novamente, obtendo-se então a massa em gramas do agregado seco (m_s).

A Equação 4 abaixo foi utilizada para obter a massa específica do agregado saturado com a superfície seca ($m_{e,sss}$).

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

Onde:

$m_{e,sss}$ – massa específica do agregado saturado com a superfície seca (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.

A Equação 5 foi utilizada para determinar a massa específica do agregado seco.

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

Onde:

$m_{e,s}$ – massa específica do agregado seco (g/cm³);

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 a seguir foi utilizada para determinar a absorção de água do agregado graúdo.

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

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).

3.2.2 Caracterização do resíduo

3.2.2.1 Determinação da massa específica do resíduo

Os resultados de massa específica do resíduo estão apresentados na Tabela 5, os mesmos foram obtidos no trabalho de Bennack (2016), visto que o resíduo é proveniente da mesma empresa. Segundo Bennack (2016), o ensaio consistiu em separar uma amostra de material seco a 120°C e outra calcinada a 900°C, sendo colocadas num picnômetro a gás, onde o gás hélio foi o agente. Após o processo realizou 10 medidas de cada amostra e fez-se a média das mesmas.

Tabela 5 - Massa específica do resíduo

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

Fonte: Bennack, 2016.

3.2.2.2 Determinação da absorção de água do resíduo

Os resultados da absorção de água foram obtidos no trabalho de Bennack (2016).

Segundo Bennack (2016) o ensaio constituiu em uma amostra de 100g de cada resíduo (cinzas de madeira 120°C e 900°C) foi separada e previamente seca em estufa a 105°C. Utilizando um molde de corpo de prova metálico cilíndrico (5x10cm), foram colocadas pequenas porções deste resíduo e, com auxílio de soquete, cada porção foi devidamente compactada para adensamento do material, até que atingisse a metade da altura do molde. A diferença volumétrica entre a amostra final e a soma do volume da água com o volume do resíduo compactado separadamente, resulta no volume de água absorvido pelo resíduo.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Absorção de água do resíduo

Resíduo	Absorção
Cinza de madeira (120°C)	24,6
Cinza de madeira (900°C)	32,5

Fonte: Bennack, 2016.

3.2.2.3 Distribuição granulométrica do resíduo

Para a determinação da distribuição granulométrica do resíduo, Bennack (2016) utilizou-se de métodos semelhantes aos utilizados na seção 3.2.1. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio de granulometria do resíduo

Resíduo	Módulo de finura	Diâmetro máximo
Cinza de madeira (120°C)	2,71	4,75
Cinza de madeira (900°C)	1,03	4,75

Fonte: Bennack, 2016.

3.2.3 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 UFSC.

Para a dosagem do concreto foi utilizado o traço 1:8:8 (cimento, brita, areia) com 7% de umidade sobre a massa seca e consumo de cimento de 80 kg/m³, cujos valores foram definidos em função de estudos anteriores (NIENKÖTTER, 2018).

A dosagem do CCR baseou-se na recomendação dada por TRICHÊS (1993), conforme Equação 7.

$$Cc = \frac{1000-V}{\frac{1}{MEC} + \frac{1}{MEag} + \frac{h(1+m)}{100}} \quad (7)$$

Onde:

Cc – 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 (%);

MEcimento – Massa específica do cimento (kg/m³);

MEagregado – Massa específica do agregado total (cm³).

Foram preparadas três formulações, onde, na Formulação 1 não houve adição de cinza, sendo esta a Formulação Básica, na Formulação 2 houve substituição de 5% de areia por cinza e na Formulação 3 de 10%.

Como a cinza da madeira possui mais finos que a areia, essa substituição acarreta na necessidade de ajustar a quantidade de água para assegurar as mesmas características em todas as formulações. A cinza tem índice de absorção de 32,5% (BENNACK, 2016), então houve a adição de água proporcional a esse consumo nas Formulações 2 e 3.

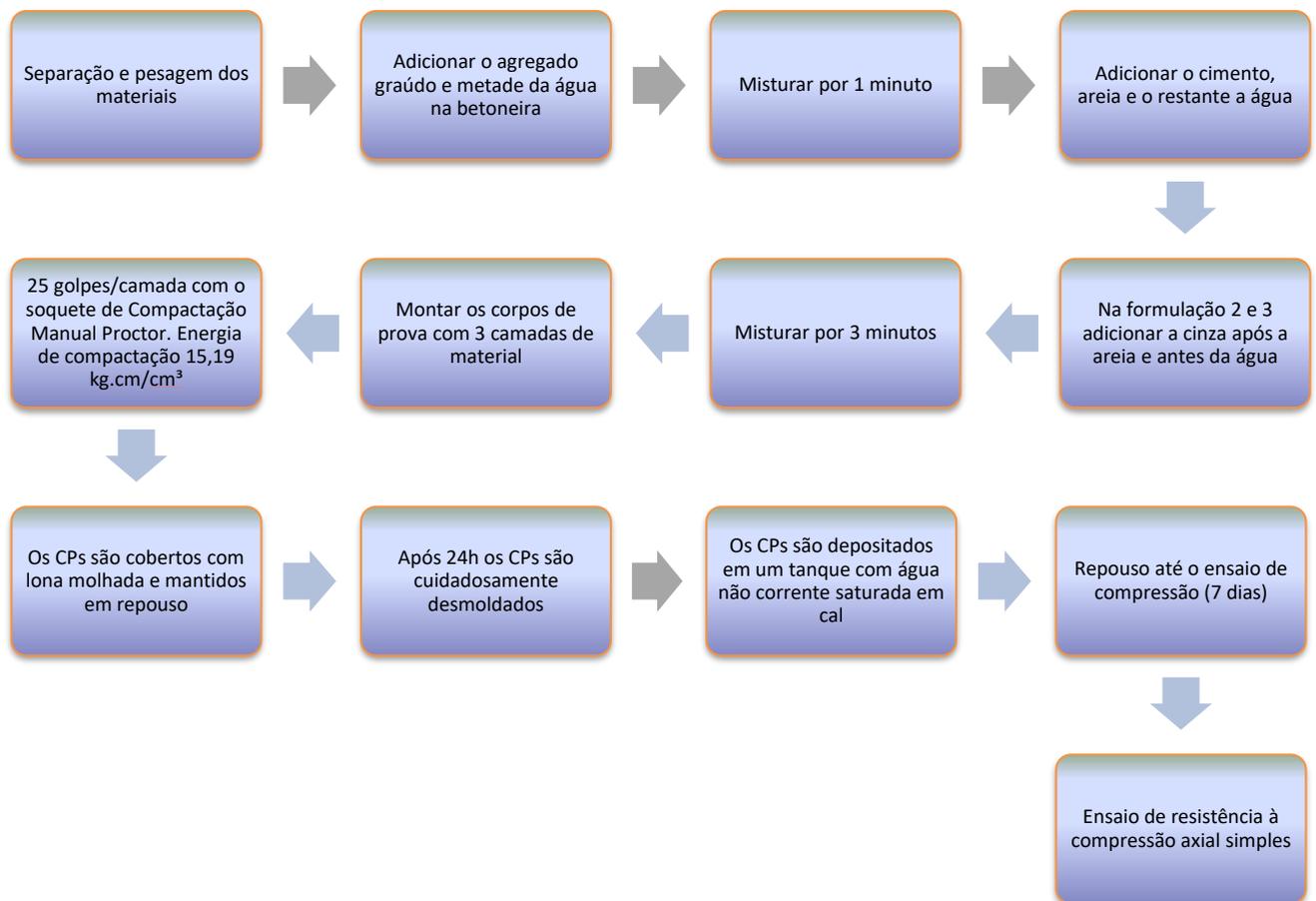
Os concretos foram preparados na betoneira elétrica, de capacidade 140 litros. A moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações do DNIT/056 (2013), com exceção aos moldes metálicos, que para este estudo foi utilizado um molde cilíndrico de 10 x 20 cm ao invés do recomendado com dimensões de 15 x 30 cm.

Para moldar os corpos de prova, fez-se uma adaptação no procedimento definido pelo DNIT/056 (2013), foram utilizados moldes metálicos cilíndricos 10x20 cm sendo preenchido em 3 camadas onde cada camada recebeu 25 golpes com o soquete proveniente de um equipamento Marshall (4,5 Kg) a uma altura de queda de 45 cm, resultando em uma energia de compactação intermediária de 15,19 kg.cm/cm³. Foram produzidos quatro corpos de prova de cada formulação, totalizando 12 corpos de prova. Logo após a moldagem, os

mesmos foram cobertos por plásticos, no intuito de evitar a evaporação de água. Os CPs 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 a seguir mostra o fluxograma das etapas para a execução dos corpos de prova.

Figura 11 - Fluxograma da execução dos corpos de prova



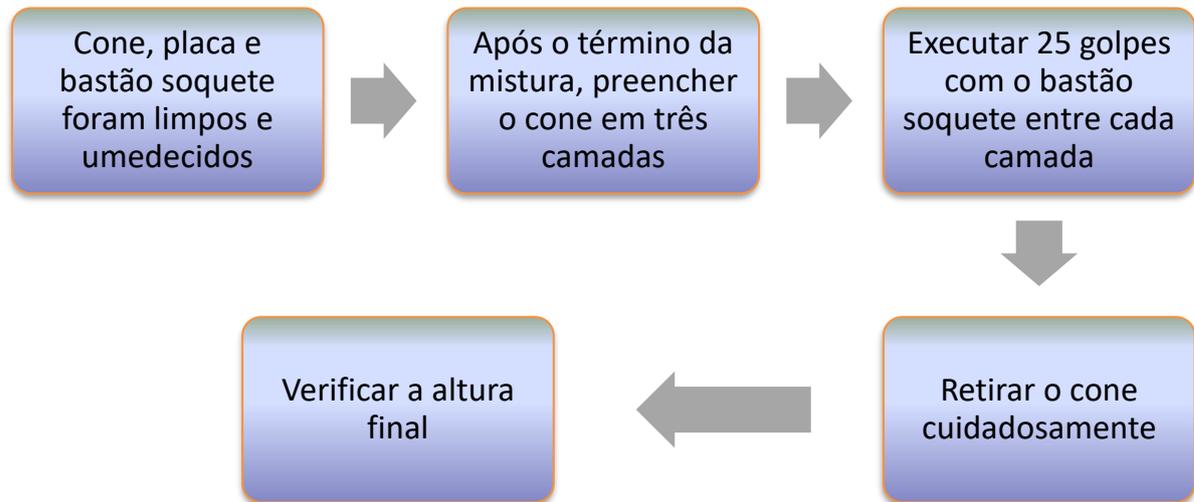
Fonte: Autora (2020).

3.2.4 Ensaio de Consistência – Slump Test

O Slump Test, também conhecido como Ensaio de Consistência de Tronco de Cone, foi realizado no Laboratório de Construção Sustentável da UFSC, seguindo a norma ABNT/NBR NM 67 (1998). O ensaio foi realizado para as Formulações 1,2 e 3.

A Figura 13 mostra as etapas que foram seguidas para a realização deste teste.

Figura 12 - Fluxograma de execução do Slump Test



Fonte: Autora (2020).

O ensaio foi realizado dentro do intervalo de tempo limite de 150 segundos.

3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado no laboratório de testes localizado na empresa Perville, em Joinville. O mesmo foi executado seguindo as especificações da norma ABNT/NBR 5739 (2018). Foram rompidos quatro corpos de prova de cada formulação aos 7 dias. O CCR quando utilizado para sub-base de pavimento rodoviário, em relação a ensaios de resistência, necessita apenas do ensaio à compressão simples.

A máquina usada para este ensaio deve ser equipada com dois pratos de aço, cujas superfícies de contato com o corpo de prova deve ter sua menor dimensão 4% superior ao maior diâmetro do CP a ser ensaiado.

Antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e o CP devem ser limpos e secos. Os corpos de prova têm as suas superfícies inferior e superior retificadas. O CP então deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior e a grade de segurança deverá manter-se fechada durante todo o procedimento.

Quando o corpo de prova possuir a relação h/d (altura/diâmetro) menor que 1,94, deve-se multiplicar então a forma máxima alcançada (F) pelo fator de correção correspondente especificado na tabela 8.

Tabela 8 - Tabela de correção de acordo com a relação altura/diâmetro do CP

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

Fonte: NBR 5739 (2018).

A resistência à compressão simples foi determinada pela Equação 7.

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

Onde:

f_c – resistência à compressão (MPa);

F – força máxima alcançada (N);

D – diâmetro do corpo de prova (mm).

3.2.6 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

As propriedades físicas do concreto foram calculadas a partir do Princípio de Arquimedes, o qual afirma que quando um corpo se encontra imerso em um fluido, existe uma força que este fluido aplica sobre o que está imerso.

Os pedaços provenientes do rompimento dos corpos de prova com 7 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.

Após as medições, foram determinadas as propriedades físicas substituindo os dados anteriores nas Equações 8, 9 e 10.

$$A = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100 (\%) \quad (8)$$

Onde:

A – absorção de água (%);

m_{sss} – massa saturada com superfície seca (g);

m_i – massa imersa (g);

m_s – massa seca (g).

$$\rho = \frac{m_s}{m_{sss} - m_i} \quad (9)$$

Onde:

ρ – densidade aparente (g/cm³);

m_{sss} – massa saturada com superfície seca (g);

m_i – massa imersa (g);

m_s – massa seca (g).

$$\eta = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_i} \times 100 (\%) \quad (10)$$

Onde:

η - porosidade aberta (%);

m_{sss} – massa saturada com superfície seca (g);

m_i – massa imersa (g);

m_s – massa seca (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

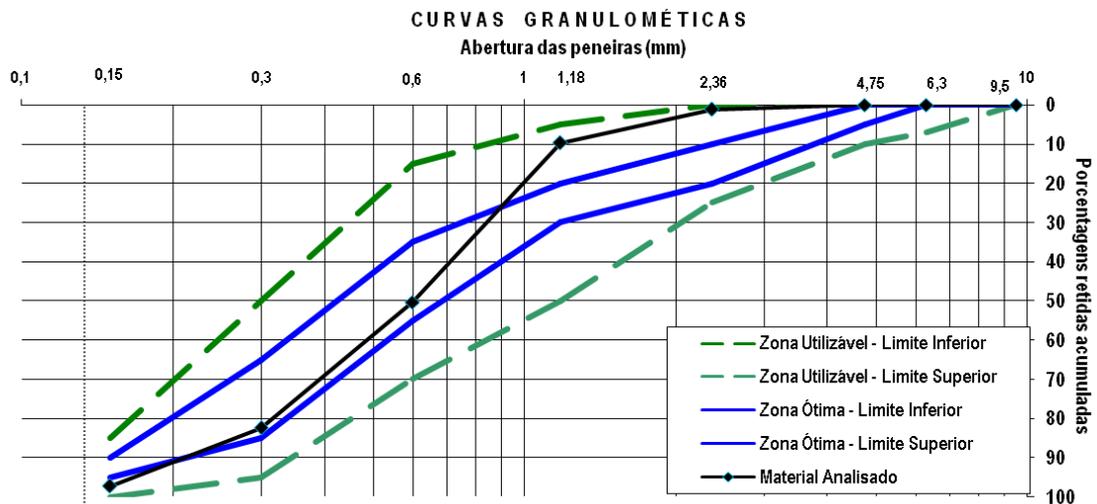
Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios detalhados no capítulo 3 anterior (Materiais e Métodos), assim como a discussão dos mesmos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Agregado Miúdo

Na sequência é apresentado o gráfico com os resultados do ensaio e a curva de distribuição granulométrica da amostra utilizada e os limites da zona utilizável superior e inferior e zona ótima superior e inferior estabelecidos na norma são mostrados no gráfico 2 a seguir.

Gráfico 1 - Curva de composição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2020).

Observa-se que a composição granulométrica utilizada está dentro dos limites estabelecidos e recomendados pela norma, as demais características físicas do agregado miúdo, como diâmetro máximo, módulo de finura, massa específica e absorção de água estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Características físicas do agregado miúdo

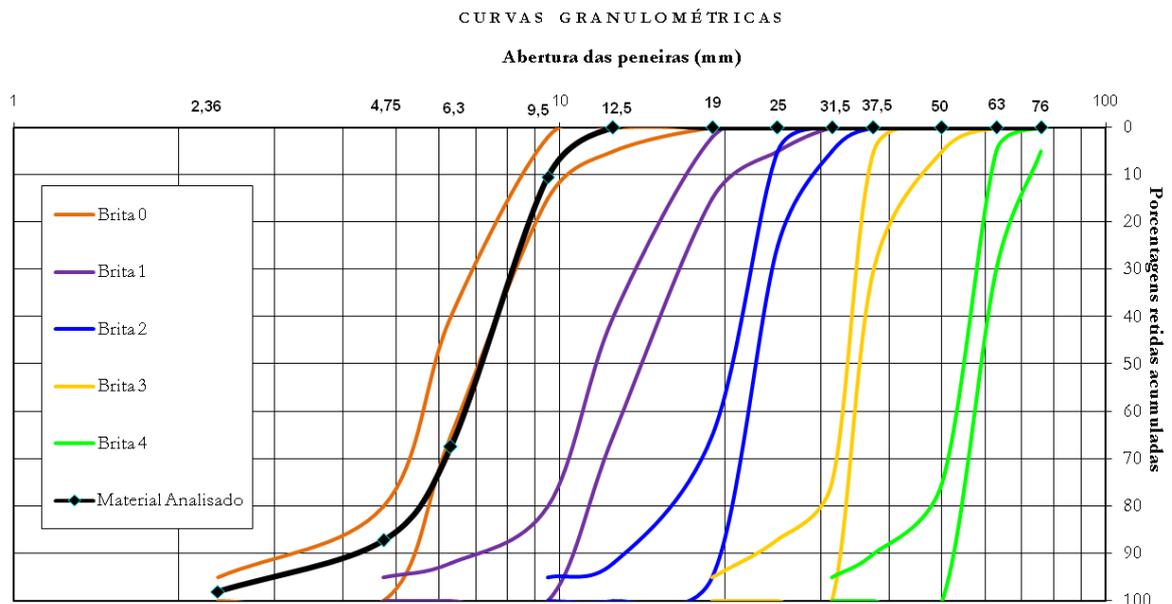
Material	Diâmetro máximo	Módulo de finura	Massa específica	Absorção de água
Agregado miúdo	2,36 mm	2,41	2,60 g/cm ³	18,02%

Fonte: Autora (2020).

4.1.2 Agregado Graúdo

A curva de distribuição granulométrica da amostra utilizada encontra-se no Gráfico 3.

Gráfico 2 - Curva de composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora (2020).

É possível observar que de acordo com os resultados do ensaio é possível classificar o agregado graúdo como brita zero.

As demais características do agregado graúdo analisados no ensaio de granulometria, como, diâmetro máximo, módulo de finura, massa específica e absorção de água estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - 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	2,68	2,28 g/cm ³	2,38 g/cm ³	4,55%

Fonte: Autora (2020).

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 10. Para o traço escolhido foi levado em consideração o consumo de cimento de 80 kg/m³ e um teor de umidade de 7%.

Tabela 10 - Dosagem dos materiais para o concreto

	Cimento (g)	Areia média (g)	Brita 0 (g)	Água (g)	Cinza (g)
Formulação 1	1176,47	9411,76	9411,76	1400,00	-
Formulação 2	1176,47	8941,18	9411,76	1400,00	470,59
Formulação 3	1176,47	8470,59	9411,76	1400,00	941,18

Fonte: Autora (2020).

Com o objetivo de mitigar a absorção de água pela cinza em comparação com a areia, assim como manter a mesma dosagem para todas as formulações, foi adicionado 360 gramas de água nas Formulações 1, 2 e 3.

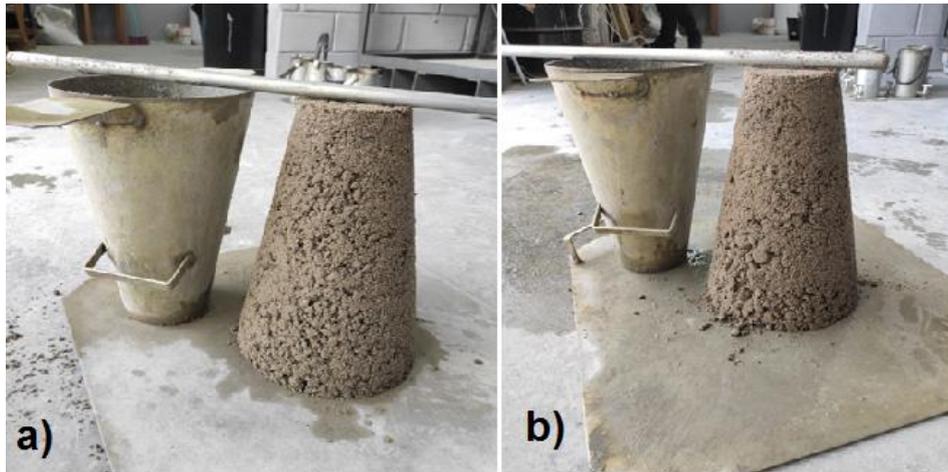
4.2.2 Ensaio de consistência

Como previsto pela Associação de Cimento Portland (2010), no desenvolvimento do ensaio de consistência Slump Test, não houve abatimento para todas as formulações. Tal característica garante que a mistura possua umidade ideal para uma compactação adequada,

mantendo a consistência seca desejada para que suporte o peso do rolo vibratório, sem perder a coesão dos materiais.

O resultado do ensaio para a Formulação 2, com 5% de cinza e da Formulação 3, com 10% de cinza está apresentado na figura 14

Figura 13 - Resultados Slump Test Formulação 2 a) e Formulação 3 b)



Fonte: Autora (2020).

4.2.3 Ensaio de resistência à compressão axial simples

De acordo com Norma DNIT 056/2013-ES a resistência característica à compressão axial simples aos 7 dias para a aplicação de CCR em sub-base é de 5 MPa. Os dados obtidos no ensaio realizado aos 7 dias após a execução do concreto são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistência à compressão do concreto aos 7 dias

Corpo de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média
Formulação 1 - Referência	2,78	2,03	2,10	2,28	2,19
Formulação 2 - Cinza 5%	1,78	1,58	1,51	1,64	1,61
Formulação 3 - Cinza 10%	0,98	1,04	1,38	1,70	1,21

Fonte: Autora, 2020.

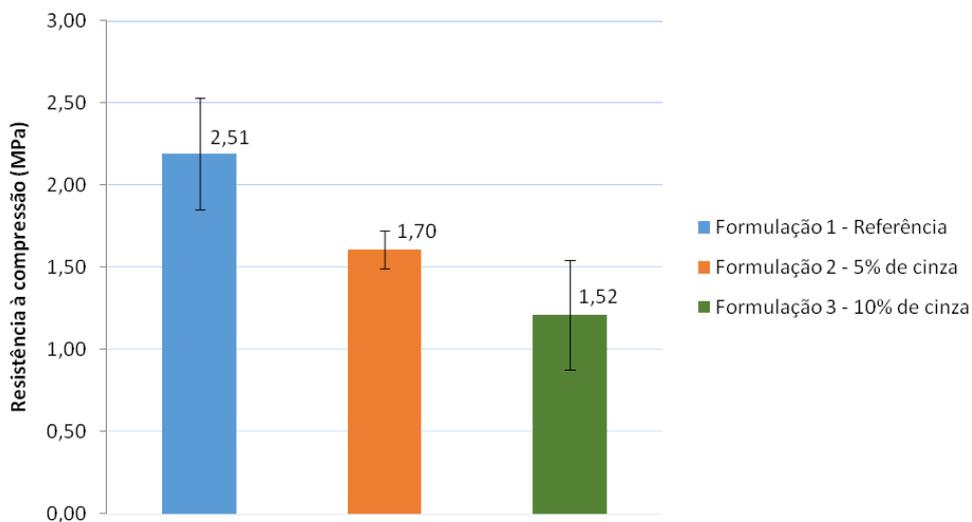
Analisando os resultados é possível verificar que a resistência à compressão não atingiu o valor mínimo considerado pelo DNIT para uso em sub-base. Esse fato pode ser justificado devido ao baixo consumo de cimento do CCR aplicado nesse estudo ou devido à

baixa relação água/cimento, não alcançando a umidade ótima da mistura em relação à hidratação do cimento.

Outra possível justificativa é devido à metodologia de cálculo de dosagem do CCR, o mesmo utiliza como parâmetros a quantidade de cimento a ser aplicado por metro cúbico e o teor de umidade e de vazios na mistura, diferentemente de um concreto convencional onde o cálculo do traço parte da resistência mecânica a ser atingida. Sendo assim a resistência alcançada fica suscetível a falhas, onde a umidade e a dosagem devem ser alterados até encontrar uma relação assertiva que alcance a resistência mínima de 5 MPa.

O Gráfico 4 apresenta os resultados de resistência a compressão axial simples e seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 3 - Resistência à compressão simples aos 7 dias



Fonte: Autora (2020).

Tomando como base a Formulação de referência, a qual possui uma média de resistência de 2,19 MPa, é possível observar que houve uma redução na resistência de 26,5% em relação à Formulação 2, a qual possui média de 1,61 MPa. Para a Formulação 3, com 1,21 MPa, houve uma redução de 44,7%.

4.2.4 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Após os ensaios de resistência, alguns fragmentos remanescentes dos corpos-de-prova foram para verificação das características físicas. Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

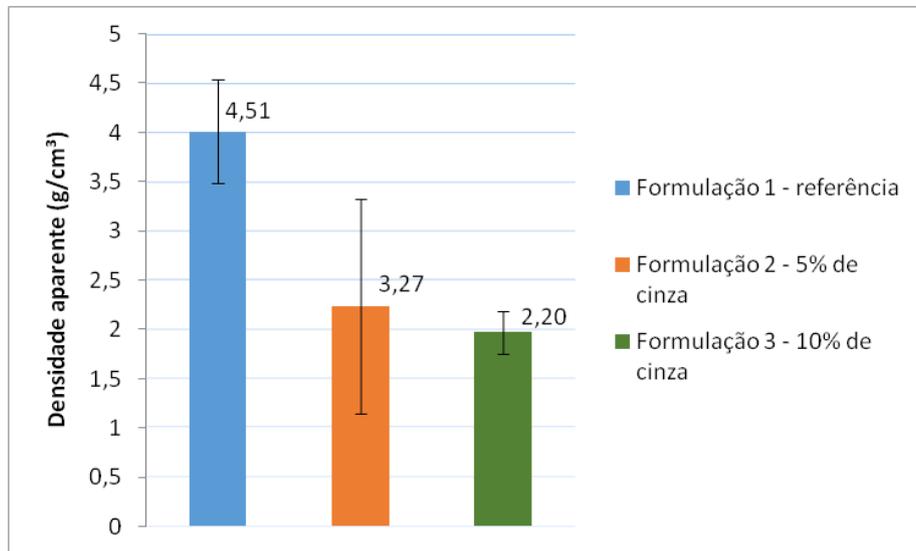
Tabela 12 - Características físicas dos corpos de prova

	Densidade aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade aberta (%)
Formulação 1	4,01	4,00	11,25
Formulação 2	2,23	5,19	11,56
Formulação 3	1,97	5,71	16,04

Fonte: Autora (2020).

O gráfico 5 traz a média dos resultados e desvio padrão dos valores de densidade aparente para cada formulação.

Gráfico 4 - Densidade aparente

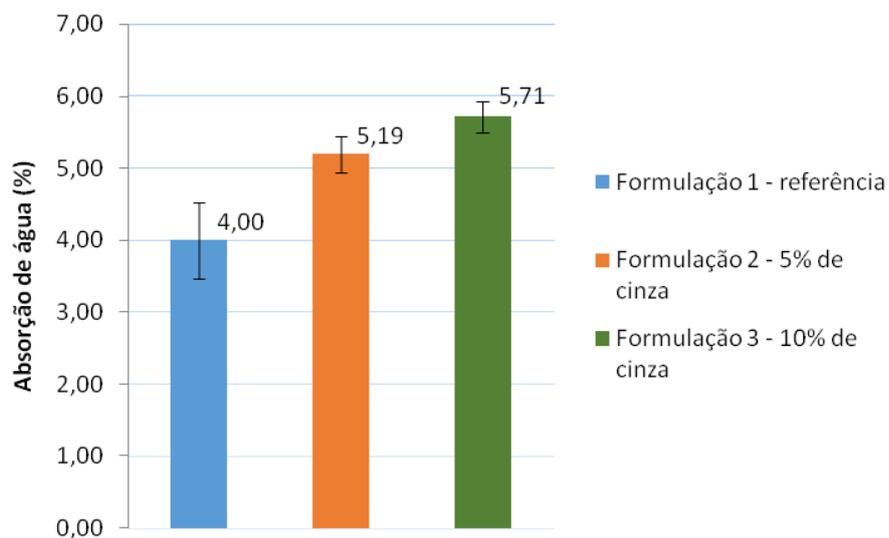


Fonte: Autora (2020).

Analisando os resultados é possível observar que houve uma redução na densidade aparente do CCR com o acréscimo de cinza. Esta redução pode estar relacionada à característica da cinza de madeira em absorver mais água que o agregado miúdo no momento da mistura, sendo que posteriormente essa mesma água ao evaporar gera vazios, diminuindo a densidade do CCR.

O Gráfico 6 apresenta os resultados médios e desvio padrão da absorção de água para as três Formulações do CCR.

Gráfico 5 - Absorção de água

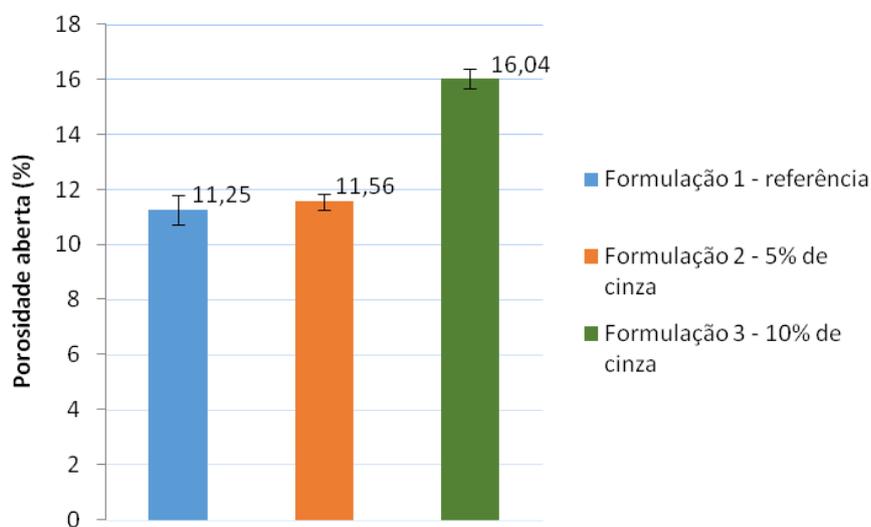


Fonte: Autora (2020).

É possível observar que o aumento da absorção de água pelos CPs é diretamente proporcional ao aumento do percentual de substituição do agregado miúdo pelas cinza de madeira.

O gráfico 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta nos corpos-de-prova.

Gráfico 6 - Porosidade aberta



Fonte: Autora (2020).

A porosidade aberta é a relação entre o volume de vazios acessíveis à água e o volume aparente da amostra, portanto, o fato da cinza ter mais finos e, conseqüentemente absorver mais água, gerando um maior número de vazios, resultou em uma maior porosidade para as Formulações 2 e 3. De forma semelhante a absorção de água está diretamente relacionada à porosidade aberta, pois quanto maior a absorção de água, maior será a sua porosidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos realizaram-se algumas correlações. A resistência a compressão simples não alcançou, em nenhuma dosagem, os 5 MPa especificados pelo DNIT para uso do CCR como sub-base de pavimentos. Esse fato foi atribuído a baixa qualidade dos granulares, o baixo consumo de cimento, a umidade ótima empregada na mistura e a metodologia de cálculo de dosagem utilizada no estudo.

A adição das cinzas faz com que a superfície de grãos a serem conectados seja maior para a mesma quantidade de cimento, já que a cinza possui um menor módulo de finura, o que acarreta em uma área superficial das partículas de cinza maior que a do agregado miúdo.

Segundo Rodrigues e Ghavami (2004), valores elevados de cinza afetam negativamente a adesão entre os grãos. Isso devido à área superficial das partículas de cinza ser maior que da areia média, logo a quantidade de cimento necessária para realizar as ligações é maior. Entretanto, o CCR utiliza baixas quantidades de cimento e efetuar essas ligações tornasse cada vez mais difícil.

Harrington et al. (2010) afirma que a transferência de cargas no CCR se dá por meio das ligações das partículas. A dificuldade para a realização dessas ligações com a adição das cinzas faz com que interfira diretamente na resistência mecânica.

No mesmo período analisado de 7 dias de cura, em porcentagens de 5% até 30% Udoeyo (2006) também afirma que tanto a trabalhabilidade quanto a resistência à compressão são reduzidas com a adição das cinzas. Esse efeito de redução está associado ao fato das partículas da cinza da madeira representar na mistura da massa do concreto um material, que, em sua essência não apresenta características de um material ligante na matriz cimentícia, mas sim de enchimento (UDOEYO et al., 2006).

Outra característica que justifica o aumento da porosidade aberta e absorção de água do concreto é a maior absorção de água da cinza, que, de acordo com Bennack (2016) é de 32,5% enquanto a da areia é de 18,02%.

Conclui-se que levando-se em consideração a maior absorção de água que da cinza há uma redução na resistência à compressão simples avaliada no estudo. Portanto, para utilizar o concreto compactado com rolo com substituição parcial de agregado miúdo por cinza de madeira para sub-base de pavimento rodoviário, seria necessário verificar novas dosagens ou percentuais de substituição da mesma. As mesmas considerações devem ser também consideradas para atingir o mínimo de resistência à compressão f_{ck} solicitadas pelo DNIT.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de compressão axial aos 28 e 90 dias de cura do CCR;
- Realizar o mesmo estudo utilizando compactação mecânica para fins comparativos;
- Estudar a influência das condições de queima nas propriedades das cinzas de madeira com o intuito de melhorar os resultados da utilização desses resíduos;
- Variar o traço a fim de se adquirir maiores valores de resistência à compressão.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAHI, M., **Characteristics of wood ash/OPC concrete**. Electronic J Pract Technol, 2006.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16312-2**: Concreto compactado com rolo – Parte 2: Preparação em laboratório. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 9775**: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR/NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **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.
- _____. **NBR/NM ISO 3210-2**: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR/NM ISO 2395**: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR/NM ISO 3310-1**: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes – **DNIT. DNIT 056/2013**: Pavimento Rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo- Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2013.
- 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: . Acesso em: 21 mai. 2018.
- ALBINO, C. B.; VISSOTTO, L. A. Comparação entre pavimento rígido e flexível. In: 3º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CENTRO UNIVERSITÁRIO DO DISTRITO FEDERAL . **Resumos...** v. 1, n. 1, p. 142, Brasília, nov. 2013. Disponível em:

<http://revista.udf.edu.br/index.php/congresso_ic/article/viewFile/86/84>. Acesso em: 5 maio 2018.

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.

ANDRADE, C. **Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de ETA e resíduos da produção de cal**. 2012. 57 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

AOKI, J. Concreto compactado a rolo. **Massa Cinzenta**. 19/02/2009. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-compactado-a-rolo/>>. Acesso em: 5 mai. 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.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 2007. Disponível em: <https://www.livrebooks.com.br/livros/pavimentacao-asfaltica-jose-tadeu-balbo-py6zcgaaqbaj/baixar-ebook>. Acesso em: 10 jun. 2020.

BENNACK, V. **Análise da viabilidade técnica da reutilização da cinza da madeira em produtos cimentícios**. 2016. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Catarina. Joinville, 2016.

BERNARDES, F. Com (bem) menos rodovias que os EUA, Brasil vê safra "empacada" na logística. **Gazeta do Povo**. 05/04/2018. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/expedicoes/expedicao-safra/2017-2018/com-bem-menos-rodovias-que-os-eua-brasil-ve-a-safra-empacada-na-logistica-burfwpzw9987ckdnh2vy57k4v>>. Acesso em: 6 maio 2018.

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

BIANCHI, F. R.; BRITO, I.R. T.; CASTRO, V.A. B. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. 08/09/2008. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, Manguinhos, 2008. 16 Slides color. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf>. Acesso em: 5 maio 2018.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHEAH, C.B.; RAMLI, M. **Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement**. Construction and Building Materials, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Brasil tem apenas 12,3% da malha rodoviária com pavimento.** 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/brasil-tem-apenas-12-da-malha-rodoviaria-com-pavimento>>. Acesso em: 5mai. 2018.

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.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação.** 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentação%20E7%E3o_05.12.06.pdf>. Acesso em: 5maio 2018.

ELINWA, A.U.; MAHMOOD, Y.A. **Ash from timber waste as cement replacement material.** Cement and Concrete Composites, 2002.

ELINWA, A.U.; EJEH, S.P. **Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars.** Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2004.

FILHO, N. M. **Resíduos da construção civil na cidade de Londrina:** análise da política de gerenciamento de resíduos da construção civil adotada pelo município e estudo de caso utilizando uma proposta de reciclagem baseada na técnica de estabilização por solidificação à base de cimento portland.. 2015. 296 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo - Usp, São Carlos, 2015.

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.

HARRINGTON, D.; ABDO, F.; ADASKA, W.; HAZAREE, C. V.; CEYLAN, H.; FATIH, B. **Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements.** 2010. In Trans Project Reports. Disponível em: <https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102/>. Acesso em: 24 jun. 2020.

HOLANDA, Eduardo. **Estradas 3:** Informações técnicas sobre pavimentação. 2010. 144 f. TCC (Graduação) – Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2010.

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-mapeiainfraestrutura-transportes-brasil&view=noticia>>. Acesso em: 24 jun. 2020.

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.

LEITE, L. F. M. **Sustentabilidade de pavimentos asfálticos**. Boletim técnico, 7. ed. 26 jun. 2013. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt07a.htm>>. Acesso em: 7 maio 2018.

LOUZADA JUNIOR, Marco Antonio et al. O contexto brasileiro e as oportunidades de aproveitamento de resíduos de madeira. **Saúde e Meio Ambiente**, Três Lagoas, v. 5, n. 3, p. 24-40, 2017. Semestral.

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

MARTINS, B. S. et al. **Concreto compactado com rolo**. 2014. 6 p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAP40AH/concreto-compactado-com-rolo#comments>>. Acesso em: 6 mai. 2018.

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete International**, Farmington Hills, v. 1, n. 1, p. 6, Out/2001.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA - MInfra. **Rodovias Federais**. 2019. Disponível em: <<https://www.infraestrutura.gov.br/rodovias-brasileiras.html#:~:text=A%20malha%20rodovi%C3%A1ria%20federal%20do,rodovias%20n%C3%A3o%20pavimentadas%20%5B2%5D>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

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

PAPI, J. A. F. **Use of sawdust and wood ashes for cement substitution in mortars and concrete**. 2015. 2 f. Dissertação (Mestrado) - School Of Architecture, Built And Natural Environments, University Of Wales Trinity Saint David (uk), Wales Trinity Saint David, 2015.

RODRIGUES, C. de S.; GHAVAMI, K. **Efeitos da adição de cinza de casca de arroz no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados por polpas de bambu**. Pirassununga, 2004.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**: volume 1. 2. ed. São Paulo, Pini, 2007.

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 Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2006.

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

SPT SONDAGENS (São Paulo). **Dimensionamento de pavimentos**. Disponível em: <http://www.sptsondagens.com.br/servicos?servico=dimensionamento>. Acesso em: 09 jun. 2020.

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

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. **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: 24 jun. 2020.