

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

ALINE ACHY

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DE MADEIRA
EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO EM SUB BASE DE PAVIMENTOS

Joinville

2018

ALINE ACHY

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DE MADEIRA
EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO EM SUB BASE DE PAVIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Me. Valéria Bennack.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Hastenpflug.

Joinville

2018

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DE
MADEIRA EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO EM SUB BASE DE
PAVIMENTOS

ALINE ACHY

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial 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 abril de 2018.

Banca Examinadora:

Profa. Me. Valéria Bennack
Orientador/Presidente

Eng. Me. Maria Rosane Vilpert Vitali

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e irmão pelo apoio emocional e financeiro durante toda minha vida acadêmica. Agradeço pelos valores transmitidos, por me ensinarem a persistir e nunca desistir dos meus objetivos. Por estarem ao meu lado em todos os momentos em que precisei e acima de tudo pela paciência e compreensão quando passei por dificuldades acadêmicas. Obrigada por me amarem incondicionalmente assim como eu os amo.

Agradeço ao amor da minha vida, meu porto seguro, meu alicerce e acima de tudo companheiro Geandle. Obrigada por ser essa pessoa maravilhosa que és, por me ensinar a cada dia como ser uma pessoa melhor. Obrigada por me amar e demonstrar isso diariamente. Agradeço ao incentivo e suporte que me desses para concluir esta graduação. Obrigada por esclarecer meus pensamentos quando eu não enxergava soluções e assim me ajudar concretizar meus sonhos. Mas acima de tudo obrigada por ser essa pessoa iluminada que faz dos meus dias muito mais felizes.

Não poderia deixar de agradecer aos meus familiares e familiares do meu namorado, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e ajudando em todos os momentos. Vocês sempre acreditaram em mim e me cederam inúmeras palavras de incentivo e carinho.

Gostaria de agradecer à minha orientadora Valéria Bennack por todo o suporte prestado não apenas durante o trabalho de conclusão de curso, mas sim por todo meu período acadêmico. Saiba que sou muito grata por todo o conhecimento adquirido durante este trabalho, sabemos que não é fácil realizar pesquisas quando não se tem os meios necessários, entretanto você foi incansável e buscou soluções para todos os problemas que obtivemos. Não existem palavras suficientes para demonstrar o quanto sou agradecida, mas saiba que você se tornou mais do que uma orientadora, és uma amiga que quero levar para a vida toda.

Agradeço também ao coorientador Daniel Hastenpflug, por todo conhecimento transmitido durante a execução do trabalho. Sabemos que durante o processo de trabalhos experimentais os resultados nem sempre são os esperados, entretanto você me apoiou e incentivou a fazer o melhor de mim, muito obrigada pela confiança.

Não poderia deixar de agradecer ao Ruan Marcos Xavier e ao Adrian Gabriel Candemil que foram colegas incansáveis durante a execução de todos os ensaios do presente trabalho. Vocês muitas vezes me lembraram o motivo da minha escolha pela engenharia, aquela sede de aprendizado e realização de novas experiências. Pude transmitir o pouco conhecimento que tenho, entretanto saibam que foi gratificante para mim.

Agradeço a equipe InfraTEC por me aceitar como membro e ajudar a aprimorar meus conhecimentos em pesquisa e trabalhos em grupo. Obrigada por se tornarem minha família em Joinville, sempre apoiando e estando presente nesse ano de muito trabalho e dedicação.

Sou grata a todos os amigos que fiz durante a graduação, em especial a Gabriela Heinzen, Rubia Meert, Felipe Hirata e Felipe Souza, Gustavo Ramos e Marcos Eing, por me ajudarem a concluir este trabalho e por estarem comigo em todos os momentos fáceis e difíceis durante a vida acadêmica. Tenho certeza que os levarei por toda minha vida, afinal que chato seriam meus dias sem vocês.

Gostaria de agradecer a Silvana Klein e Caroline Malheiros por serem amigas excepcionais durante a graduação, passamos muitos momentos de dificuldade, provas, trabalhos e noites sem dormir, mas sempre estivemos juntas. Vocês me deram o apoio que precisei em momentos que quase desisti, meu muito obrigada por serem essas pessoas iluminadas que a graduação me presenteou.

Agradeço a Fernanda Giacomoni, por todo o apoio, companheirismo e força que me deu durante a minha graduação. Amizades que perduram por mais de 12 anos são raríssimas em nossas vidas e você mesmo estando longe se fez presente me incentivando e apoiando em cada desafio que encontrei no decorrer da faculdade. Obrigada pelas inúmeras vezes que me aconselhou e me mostrou que todo meu esforço teria um propósito e que no final tudo valeria a pena. Obrigada por ser a minha pessoa.

Gostaria de agradecer a Anhanguera, Sociesc, Perville e Litoral Sul, que cederam espaço e equipamentos necessários para a execução do trabalho.

RESUMO

O crescente carregamento imposto pelo tráfego aos pavimentos é um dos responsáveis pelo desgaste precoce das rodovias. Devido a necessidade de mudanças na malha rodoviária brasileira e da quantidade de resíduos produzidos pela indústria madeireira, buscou-se uma alternativa sustentável que pudesse conciliar um bom desempenho nos pavimentos com o reaproveitamento de materiais. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade do reaproveitamento do resíduo (cinza de madeira) como adição mineral no Concreto Compactado com Rolo para sub-base de pavimentos rígidos. Primeiramente foi realizada a caracterização dos agregados e do resíduo através do ensaio de granulometria, massa específica, absorção de água e teor de umidade. Na sequência definiu-se a dosagem e estudou-se os efeitos da substituição do agregado miúdo pela cinza de madeira em proporções de 0%, 5% e 10% na mistura do concreto. Foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral, porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente. Os resultados indicam que a substituição do resíduo em baixas porcentagens proporciona ganhos de resistência ao concreto.

Palavras-chave: Adição mineral, resíduo, concreto compactado com rolo, sustentável.

ABSTRACT

The growing load imposed for the traffic to the pavement, is responsible for the early use of highways. Due to the need for improvements in the Brazilian road network and the demand for the residue produced by the timber industry, it was sought a sustainable alternative that could combine an improvement in the pavements and the reuse of materials. Thus, the present work has the objective of analyzing the feasibility of the reuse of the residue (wood ash) as a mineral addition in Roller Compacted Concrete for the subbase of rigid pavements. First, the characterization of the aggregates and the residue was carried out by means of the particle size distribution, specific mass, water absorption and moisture content tests. Then, the effects of the substitution of the fine aggregate by the wood ash in proportions of 0%, 5% and 10% in the concrete mixture were studied. Tests of consistency, axial compressive strength, tensile strength by diametral compression, open porosity, water absorption and bulk density were performed. The results indicate that the substitution of the residue in low percentages provides strength gains in concrete.

Key words: Mineral addition, residue, Roller Compacted Concrete, sustainable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução da condição da superfície do pavimento nas Rodovias Públicas (em%)..	16
Figura 2: Esquema da seção transversal do pavimento rígido.....	17
Figura 3: Esquema da seção transversal do pavimento flexível.....	18
Figura 4: Deformação elástica devido a carga no pavimento flexível.	20
Figura 5: Deformação devido a carga no pavimento rígido.	21
Figura 6: Diversos tipos de resíduos da madeira.	27
Figura 7: Materiais utilizados: Cimento (a); Areia média (b); Brita 0 (c); Cinza (d).....	30
Figura 8: Conjunto de peneiras utilizadas na determinação da granulometria.....	33
Figura 9: Prensa utilizada no ensaio de compressão simples.	42
Figura 10: Prensa utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	43
Figura 11: Pesagem do frasco (a); Pesagem do conjunto (b); Pesagem do conjunto mais água (c); Pesagem após estufa (d).	47
Figura 12: Pesagem do agregado saturado com superfície seca (a); Pesagem do agregado imerso em água (b); Pesagem do agregado seco em estufa (c).	48
Figura 13: Etapas para realização do ensaio.....	49
Figura 14: Molde cilíndrico preenchido (a); Frasco Chapman em repouso (b); Leitura após 5 dias (c).	50
Figura 15: Molde com material adensado (a); Frasco sendo preenchido (b); Mistura do conjunto (c).....	51
Figura 16: Concreto referência no estado fresco.	53
Figura 17: Abatimento das formulações: Referência (a); 5% de cinza (b); 10% de cinza (c).	54
Figura 18: Soquete (a); Compactação da mistura (b); Corpo de prova compactado (c); Corpos de prova cobertos (d).	54
Figura 19: Corpos de prova: Referencia (a); 5% de cinza (b); 10% de cinza (c).....	55
Figura 20: Corpos de prova imersos em água com cal.....	55
Figura 21: Pesagens realizadas no ensaio.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica da areia média.....	46
Gráfico 2: Curvas granulométricas de classificação de agregados graúdos.....	47
Gráfico 3: Curva granulométrica do resíduo.	52
Gráfico 4: Resistência à compressão do concreto aos 7 dias.	56
Gráfico 5: Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.	57
Gráfico 6: Resistência à tração por compressão diametral.....	59
Gráfico 7: Densidade aparente.	61
Gráfico 8: Absorção de água.	62
Gráfico 9: Porosidade aberta do CCR.	63
Gráfico 10: Absorção x Porosidade x Densidade aparente.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do Cimento Portland V ARI.....	29
Tabela 2: Massa específica do resíduo.	39
Tabela 3: Resultado de granulometria do agregado miúdo.	45
Tabela 4: Resultado de granulometria do agregado graúdo.	46
Tabela 5: Massa específica do agregado miúdo.	48
Tabela 6: Massa específica do agregado graúdo.	49
Tabela 7: Teor de umidade.	50
Tabela 8: Absorção de água.....	50
Tabela 9- Absorção do resíduo.	51
Tabela 10: Resultado de granulometria do resíduo.	52
Tabela 11: Dosagem utilizada.	53
Tabela 12: Resistência à compressão do concreto aos 7 dias.....	55
Tabela 13: Resistencia à compressão do concreto aos 28 dias.....	57
Tabela 14: Resistência à tração por compressão diametral.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	METODOLOGIA	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA	15
2.2	PAVIMENTAÇÃO	17
2.2.1	Subleito	18
2.2.2	Regularização.....	18
2.2.3	Reforço do subleito	18
2.2.4	Sub-base	19
2.2.5	Base	19
2.2.6	Revestimento.....	19
2.3	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	20
2.3.1	Pavimentos Flexíveis	20
2.3.2	Pavimentos Rígidos	21
2.4	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR).....	22
2.4.1	Vantagens e desvantagens do uso de CCR.....	24
2.5	ADIÇÕES MINERAIS	25
2.5.1	Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos de madeira	26
2.5.2	Cinza de madeira.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	MATERIAIS	29
3.2	MÉTODOS.....	30

3.2.1	Caracterização dos agregados.....	30
3.2.2	Caracterização do resíduo	38
3.2.3	Dosagem do concreto.....	39
3.2.4	Preparação dos corpos de prova	40
3.2.5	Ensaio de resistência à compressão simples.....	42
3.2.6	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	43
3.2.7	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	45
4.1.1	Determinação da distribuição granulométrica	45
4.1.2	Determinação da massa específica	47
4.1.3	Determinação do teor de umidade do agregado miúdo	49
4.1.4	Determinação da absorção de água pelo agregado miúdo	50
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	51
4.2.1	Determinação da absorção de água	51
4.2.2	Determinação da distribuição granulométrica	52
4.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	53
4.3.1	Dosagem do concreto.....	53
4.3.2	Preparação dos corpos de prova	53
4.3.3	Ensaio de resistência à compressão axial	55
4.3.4	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	58
4.3.5	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	60
5	CONCLUSÕES	65
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem considerada semi-infinita, destinada a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e a propiciar aos usuários melhores condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2006).

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, 2017).

Segundo dados da Confederação Nacional do Transportes (CNT), a malha rodoviária nacional é composta por 1.720.756 km, sendo apenas 12,3% pavimentada (211.468 km). Ainda neste dado é evidenciado que as rodovias já pavimentadas se encontram em péssimas condições de uso, o que confirma a estimativa de que o pavimento projetado no Brasil dura de 8 a 12 anos, enquanto em países desenvolvidos são dimensionados para até 30 anos.

A baixa expectativa está diretamente relacionada com problema de investimentos públicos em projetos de dimensionamentos, novas tecnologias, fiscalização, sinalização, manutenção e execução adequada de projetos com materiais adequados conforme o nível de solicitação.

Consequentemente o volume de estradas a ser pavimentado no Brasil é muito grande, abrindo 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).

Uma das características de estudos em concreto é que permite a utilização de materiais não convencionais em sua formulação, logo a utilização de materiais alternativos que provavelmente seriam descartados em aterros, mostra-se bastante atrativo. Pesquisas buscam utilizar resíduos como adição mineral ao concreto no intuito de otimizar a resistência, durabilidade e principalmente reduzir os custos finais (SILVA, 2006).

Atualmente o Brasil é o maior cultivador mundial de árvores plantadas para fins de processamento industrial, área essa que alcança 7,84 milhões de hectares, conseqüentemente torna-se uma expressiva geradora de resíduos, desde o processo de extração até a queima em caldeiras, chega a produzir cerca de 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano (LOUZADA JUNIOR et al., 2017).

O trabalho se justifica, pois, busca alternativas mais sustentáveis para gestão desses resíduos incorporando a cinza da madeira na dosagem do CCR em substituição parcial da areia, visando uma estrutura de pavimento com menor custo, resistente à demanda de tráfego e principalmente sustentável.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é estudar em laboratório a influência da substituição do agregado miúdo pela cinza de madeira no comportamento do CCR.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterização física dos agregados e da cinza;
- Definição do traço e dosagens
- Elaboração de corpos-de-prova para realização dos ensaios;
- Verificação da consistência do concreto (*slump test*);
- Avaliação das características mecânicas (resistência à tração na compressão diametral -28 dias e compressão axial -7 e 28 dias);
- Determinação das características físicas (massa específica, densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta do concreto).

1.2 Metodologia

O método de pesquisa utilizado no trabalho foi o experimental, que segundo Fachin (2006), caracteriza-se por ser um método de variáveis manipuladas de forma pré-determinada e controlada pelo pesquisador para observação do estudo.

O experimento visa substituir parcialmente o agregado miúdo pela cinza de madeira. Serão realizados corpos de provas com teores de 0%, 5% e 10% de cinza, os mesmos serão ensaiados em laboratório para avaliação de propriedades físicas e mecânicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas informações relacionadas a 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 BRASILEIRA

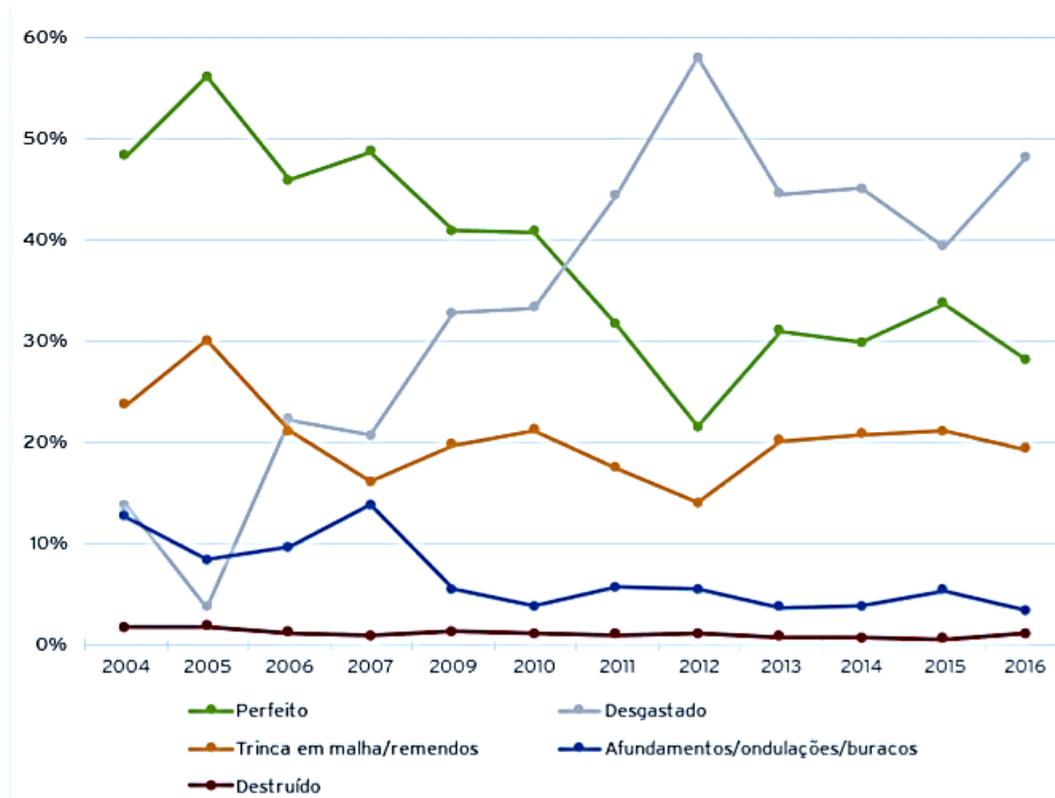
O transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 90% do tráfego de passageiros e mais de 60% da circulação de cargas no território nacional. Fato este que enfatiza a importância de investimentos em manutenção, construção e infraestrutura no intuito de garantir a eficiência, economia e segurança ao usuário (PADULA, 2008).

Segundo dados da CNT (2017), 48,3% das rodovias são avaliadas como Regulares/Ruins ou péssimas, fato este que aumenta os custos operacionais de transporte em função da precariedade dos pavimentos, impactando em vários setores da economia brasileira. Justificando o aumento aproximado de 24,9% no custo operacional de transporte (desgastes de peças veiculares e aumento do tempo médio de viagem).

Além disso, é constatado o consumo extra de combustível em função do estado das rodovias, o que em 2016 resultou em cerca de 775 milhões de litros de diesel a mais do que o necessário, custando ao transportador o equivalente a R\$ 2,3 bilhões adicionais (CNT, 2017).

Através da Figura 1 é possível constatar que os pavimentos em perfeito estado se encontram em decadência, principalmente aqueles em domínio de gestão pública, que a partir de 2010 foram gradativamente mudando 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. Basicamente são utilizados dois métodos de dimensionamento, o empírico e o mecanístico-empírico, que determinam a espessura ideal e o material constituinte de cada camada, de forma que suporte adequadamente os esforços provenientes do tráfego (HOLANDA 2010).

Os métodos empíricos baseiam-se em fórmulas e em experiências previamente obtidas em campo, resultando em limitações devido a aplicabilidade apenas em climas e condições de campo semelhantes as estudadas. 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 proposto por Westergaard que permite com o auxílio de ábacos 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.

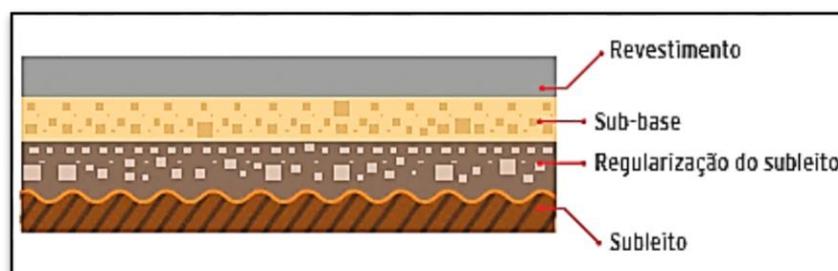
2.2 PAVIMENTAÇÃO

Pavimento é uma estrutura, composta por camadas sobrepostas de materiais distintos compactados a partir do subleito do corpo estradal, deve ser adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e com o mínimo custo possível. (BALBO, 2007).

Segundo o DNIT (2006), a principal função do pavimento é receber os esforços gerados pelo tráfego e transmiti-los para as camadas inferiores sendo que os materiais pertinentes a cada camada e seu respectivo dimensionamento são definidos de acordo com a necessidade de resistência (camadas mais superficiais são submetidas a maiores esforços que as demais).

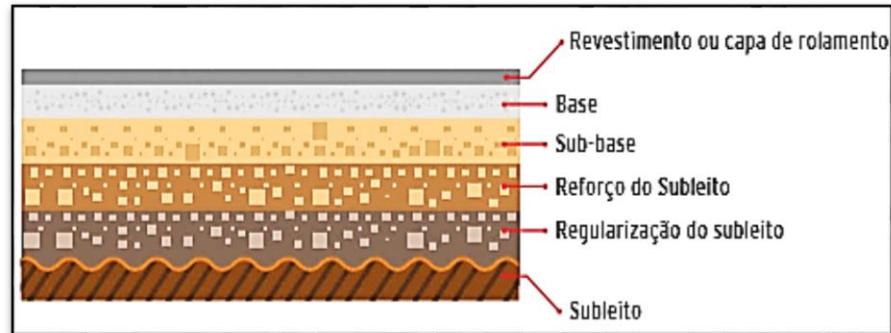
Bernucci *et al.* (2006) classifica os pavimentos como rígidos (Figura 2) e flexíveis (Figura 3).

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

O subleito, também conhecido por terreno de fundação ou camada final de terraplenagem, é um semi-espaço teoricamente infinito, onde são assentadas as outras camadas finitas que compõem o pavimento (DNIT, 2006).

O subleito é constituído de material natural consolidado e compactado, sendo estudado até a profundidade onde as cargas de tráfego são significativas, que devem variar entre 0,6 a 1,5m (CNT,2017).

2.2.2 Regularização

A regularização não é definida como uma camada propriamente dita, pode ser denominada como preparo de subleito e tem por função nivelar o terreno de fundação tanto transversalmente quanto longitudinalmente, além de estabelecer as características geométricas necessárias (inclinação transversal) (CNT, 2017). O material empregado na regularização normalmente é o do próprio subleito que foi retirado durante a execução de corte do terreno, ou quando inexistente, de uma jazida de empréstimo onde o material deve atender as especificações de suporte e expansão (DNIT, 2006).

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

utilizado 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

A CNT (2017) define como “camada complementar à base e executada por circunstâncias técnico-econômicas quando a camada da base exigida for muito espessa”. Assim como todas as camadas, possui a função de resistir e distribuir esforços verticais, entretanto quando necessário, drena infiltrações e controla a ascensão capilar da água.

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 que recebe maior esforço vertical depois do revestimento, dependendo de sua qualidade ou do tipo de revestimento empregado pode-se dispensar o uso da sub-base ou do reforço de subleito (SENÇO, 1997). A camada de base é executada apenas em pavimentos flexíveis, fato este que está relacionado com a capacidade estrutural de suporte do revestimento.

Os materiais utilizados nessa camada podem ser os mesmos listados para uso na camada de reforço de subleito, entretanto de melhor qualidade (características físicas superiores) (CNT, 2017).

2.2.6 Revestimento

Segundo a ABNT/NBR NM 7207 (1982), a camada de revestimento deve proporcionar ao usuário uma superfície de rolamento confortável, segura e durável. A durabilidade do pavimento está diretamente relacionada resistência ao intemperismo e a demanda de tráfego. O conforto está associado à capacidade do pavimento em proporcionar um rolamento suave ao

usuário. Já a segurança refere-se à interação veículo-revestimento, que normalmente é afetada devido à baixa qualidade das rodovias (SENÇO, 1997).

A camada pode ser constituída por diversos materiais, definidos a partir das necessidades de projeto, demanda de tráfego ou finalidade da via (DNIT, 2006).

2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS

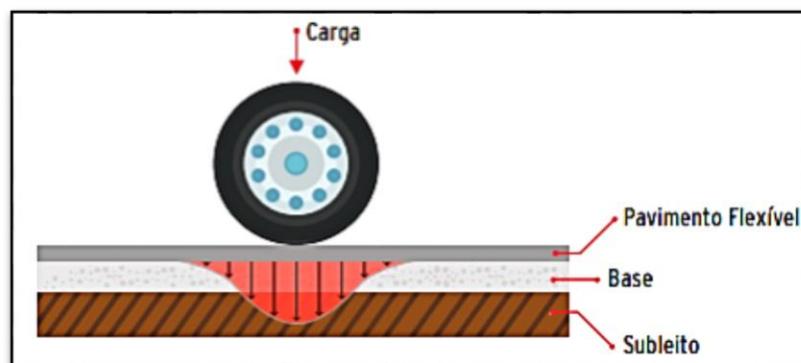
Bernnucci *et al.* (2006), afirma que de acordo com os tipos de materiais empregados em cada camada e suas características tecnológicas, os pavimentos podem ser classificados como flexíveis ou rígidos.

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

Segundo Araújo *et al.* (2016), os pavimentos flexíveis são assim denominados devido as suas camadas sofrerem deformações elásticas, onde as cargas decorrentes do tráfego se distribuem de forma equivalente, gerando maiores tensões aplicadas às camadas de superfície do pavimento, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Deformação elástica devido a carga no pavimento flexível.

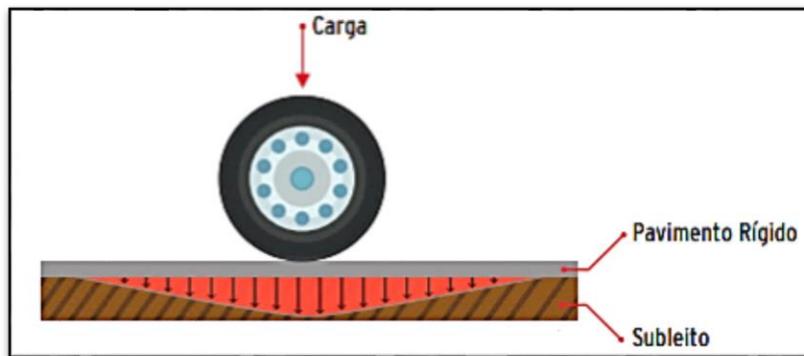


Fonte: CNT, 2017.

2.3.2 Pavimentos Rígidos

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.

A principal matéria prima do pavimento rígido é o concreto de cimento Portland, o que torna esse tipo de revestimento pouco deformável, gerando menores esforços verticais nas camadas inferiores e principalmente sobre o subleito (HOLANDA 2010) .

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 estacionamentos, vias de acesso e desvios com tráfego leve.

A CNT (2017), apresenta-se um comparativo entre as características dos pavimentos flexíveis e rígidos (Quadro 1).

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 (CCR)

O CCR é um método utilizado principalmente na construção de barragens e pavimentos, é um concreto com aspecto “seco”, consolidado através de compactação, executado geralmente por rolos compressores vibratórios, usualmente empregados na compactação de materiais granulares (RICCI, 2007).

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 consumo de cimento pode variar dependendo da aplicação final do material, com baixo consumo de cimento o CCR obtém uma aparência semelhante a brita graduada tratada com cimento (BGTC); com o aumento do consumo, a aparência se assemelha a de um concreto convencional (ABREU, 2002).

É importante ressaltar que o Brasil é um dos maiores produtores de cimento do mundo, produziu 57 milhões de toneladas em 2016, sem alcançar sua capacidade máxima que é de 100 milhões de toneladas ao ano (SNIC, 2018). Fato este que permite o fácil acesso a este insumo em todo território nacional, tornando essa matéria-prima ainda mais atrativa (TOFFOLO, 2015).

Os equipamentos necessários para execução do CCR são os mesmos utilizados em pavimento asfáltico, ou seja, moto niveladoras e rolos compactadores vibratórios lisos ou de pneus (TOFFOLO, 2015).

Para a fabricação do CCR, utiliza-se materiais convencionais como cimento, areia, brita e água e seu transporte é realizado por caminhões-betoneira ou basculantes em função de sua consistência “seca” (RICCI, 2007).

Ainda segundo Ricci (2007), o CCR pode ser empregado de diversas maneiras no ramo da engenharia, “cada campo de aplicação apresenta suas particularidades em termos de resistência mecânica, consumo de cimento, dosagem, execução e controle tecnológico”. No entanto, existe um destaque maior para utilização do mesmo como sub-base de pavimentos rígidos ou flexíveis.

2.4.1 Vantagens e desvantagens do uso de CCR

Segundo Toffolo (2015), algumas vantagens do CCR devido a sua tecnologia:

- Produtividade superior ao do concreto convencional (não necessita de equipamentos especializados);
- Economia de 15% a 30% comparada com outras tecnologias;
- Busca aproveitamento de novos materiais (agregados);
- Elevada rigidez contribuindo para o não surgimento de deformações no revestimento;
- Produção pode ser feita em centrais de dosagens de concreto;
- O transporte pode ser realizado através de caminhão betoneira ou basculante;
- A cura do concreto pode ser realizada com água através de um caminhão espargidor;
- O CCR pode produzir benefícios ambientais;

Em rodovias de alta velocidade sua regularização é prejudicada, sendo necessário, em algumas situações, executar uma outra camada de revestimento no intuito de obter um acabamento mais adequado (SALINAS 2002).

Segundo Toffolo (2015), uma limitação do CCR é a espessura máxima das camadas durante o processo de construção, que em função dos equipamentos utilizados podem atingir no máximo 20 cm, fato que impõe a necessidade de executar duas ou três camadas para atingir a espessura determinada em projeto.

A hidratação adequada, a compactação na umidade ótima e a cura do CCR é um fator crítico, pois são processos de difícil controle em campo e, portanto, necessitam de maior atenção, visto que são de suma importância para durabilidade do pavimento. Sendo assim o fator de maior importância no processo executivo é o controle tecnológico, pois pequenas variações de umidade e densidade afetam diretamente na resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade do CCR (TOFFOLO, 2015).

2.5 ADIÇÕES MINERAIS

“Adições são produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características” (ABNT/NBR 11172, 1990). Mehta e Monteiro (2008) definem adições minerais como materiais insolúveis finamente moídos providos de fontes naturais ou subprodutos industriais.

Segundo Melhotra 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.

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais podem ser classificadas de acordo com sua ação físico-química, 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-aluminioso. 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 compactidade da mistura e conseqüentemente refinamento dos poros.

2.5.1 Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos de madeira

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, visto que futuras gerações também têm o direito de desfrutar dos benefícios dispostos pelo meio ambiente, adotando assim um novo modelo denominado como desenvolvimento sustentável (CABRAL, 2007).

Através de pesquisas, descobertas científicas e técnicas, materiais inovadores poderão servir de subsídios para produção de novos bens de consumo à população. Entretanto, o crescimento de bens de consumo acarreta a produção de significativas quantidades de resíduos, impactando diretamente ao meio ambiente (MODRO *et al.*, 2009).

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).

Segundo John *et al.* (2003), é possível utilizar como adição mineral qualquer tipo de cinza predominantemente siliciosa, de origem industrial ou vegetal, produzida no estado amorfo e de granulometria adequada.

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.

As indústrias madeireiras aplicam medidas rigorosas relacionadas à destinação dos resíduos, atendendo aos requisitos legais. No ano de 2016 produziu-se cerca de 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos proveniente de plantações de pinus e eucalipto. Destes, 70,5% são referentes a atividades florestais e 29,5% industriais (LOUZADA JUNIOR *et al.*, 2017). Diante desta constatação, é necessário buscar alternativas mais sustentáveis e ecologicamente corretas para a destinação dos resíduos.

Sendo assim, 99,7% dos resíduos produzidos por atividades florestais (cascas, galhos e folhas), são mantidos no local de extração, servindo como adubo e proteção ao solo. Já no setor industrial, 66% são destinados à geração de energia (em sua maioria nas caldeiras de vapor e eventualmente na geração de energia elétrica) e 25,5% dos resíduos (cavacos, serragem e

aparas de papel) torna-se matéria-prima de empresas do ramo madeireiro (LOUZADA JUNIOR *et al.*, 2017).

Devido a magnitude dos valores apresentados, qualquer ação que objetive o reaproveitamento gera impacto positivo ao meio ambiente, reduzindo o número de aterros e consequentemente os agentes poluentes.

2.5.2 Cinza de madeira

As caldeiras geradoras de energia permitem o reaproveitamento de todos os resíduos da manufatura madeireira, entretanto são responsáveis pela produção de um segundo resíduo, mais comumente conhecido como cinza de madeira (WIECHETECK, 2009). Este resíduo é gerado a partir da combustão incompleta da madeira quando utilizada como fonte de energia, gerando milhares de toneladas de cinza, que em sua maioria são destinados a aterros (BENNACK, 2016).

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.

As cinzas provenientes do aproveitamento de resíduos de madeira, têm essencialmente em sua composição: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, MgO, SO₃, TiO₂, P₂O₅ (UDOYEO *et al.*, 2006). A composição química da cinza é influenciada pela espécie escolhida, o segmento da planta utilizado na combustão, a idade, o armazenamento, entre outros fatores (HORTA, 2010).

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.

De acordo com Resende (2013), dependendo de sua composição química, a cinza volante pode ser empregada em substituição parcial ao cimento, agindo como material cimentante, ou em substituição ao agregado miúdo, funcionando como fíler para correção da granulometria.

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, tempo de pega e resistência do concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta capítulo são detalhados os materiais e os ensaios realizados no desenvolvimento experimental do trabalho.

3.1 MATERIAIS

Os materiais componentes do concreto compactado com rolo são: cimento, areia, brita e água. Como o intuito da pesquisa considera a análise da viabilidade da utilização de cinza de madeira em substituição a areia, a mesma também foi caracterizada.

O cimento utilizado na mistura é classificado como CP V ARI, da linha de cimentos da Votorantim. A Tabela 1 apresenta as características técnicas do produto.

Tabela 1: Composição do Cimento Portland V ARI

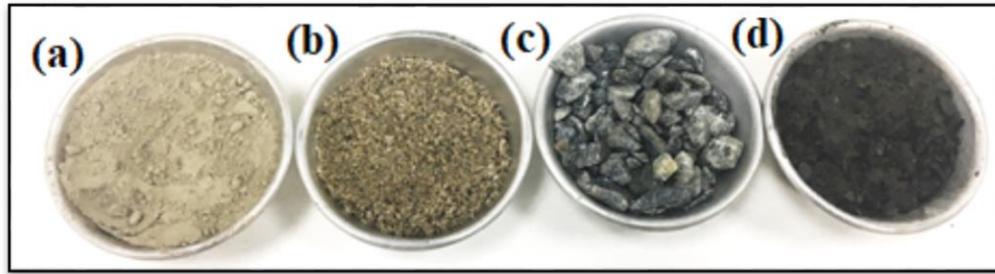
Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: Adaptada de ABCP, 2015.

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.

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 7.

Figura 7: Materiais utilizados: Cimento (a); Areia média (b); Brita 0 (c); Cinza (d).



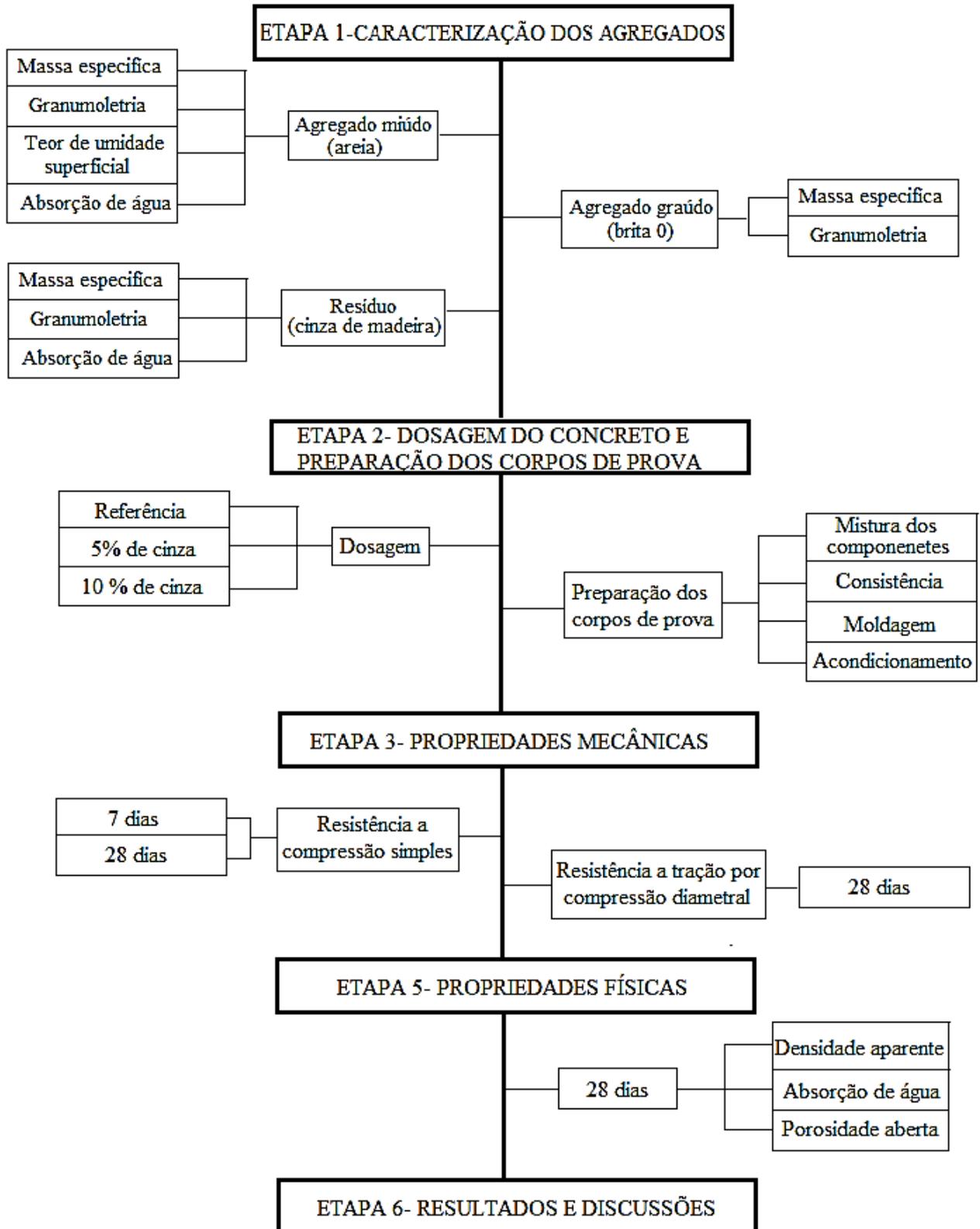
Fonte: Autor, 2018.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização dos agregados

Todos os ensaios de caracterização realizados pela autora foram executados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC-Joinville. O Fluxograma 1 apresenta a metodologia de pesquisa do trabalho.

Fluxograma 1: Metodologia de pesquisa.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.1.1 Determinação da distribuição granulométrica de 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 conforme diretrizes da ABNT/NBR NM 248 (2003) 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 execução do ensaio separou-se amostras de 1000g de cada agregado, foram colocadas na estufa à temperatura de 105°C, onde permaneceram por 24 horas. Após esse período foram retiradas da estufa e esfriadas à temperatura ambiente até prosseguirem para pesagem. As amostras foram divididas em duas partes, contendo 500 g cada, desta forma ensaiou-se duas vezes cada agregado. O resultado final foi dado pela média entre os ensaios.

Primeiramente as peneiras foram limpas e encaixadas conforme abertura da malha. As peneiras utilizadas foram 9,5mm-6,3mm-4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm, formando assim um único conjunto provido de fundo e tampa.

Posicionou-se o conjunto no agitador eletromagnético, onde a amostra foi levemente despejada sobre a peneira superior e iniciou-se o processo de agitação mecânica por aproximadamente 5 minutos. Posteriormente, removeu-se a peneira superior, de maior abertura, onde foi encaixado um fundo para dar início ao procedimento de agitação manual. O material passante foi adicionado a peneira seguinte e o processo foi repetido com todas as aberturas. As porções retidas em cada peneira foram pesadas e a partir desses dados as curvas granulométricas foram traçadas.

Utilizando a ABNT/NBR 7211 (2009), pode-se determinar o módulo de finura e o diâmetro máximo característico dos agregados.

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 8 ilustra as peneiras utilizadas para o ensaio.

Figura 8: Conjunto de peneiras utilizadas na determinação da granulometria.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.1.2 Determinação da massa específica do agregado miúdo

Segundo a ABNT/NBR NM 52 (2009), a massa específica é “a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis”. A mesma também define massa específica aparente como “a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis”.

Para o ensaio respeitou-se os parâmetros definidos nas normas ABNT/NBR NM 52 (2009), ABNT/NBR NM 26 (2009) e ABNT/NBR NM 27(2001).

Inicialmente pesou-se 500g de amostra do agregado seco, que em seguida foi despejado no frasco para registro da massa do conjunto. Em seguida adicionou-se água ao frasco até a marca de 500ml. No intuito de remoção das bolhas de ar foram realizados movimentos circulares para posteriormente levar o frasco a um banho mantido a temperatura constante de 21°C. Após cerca de 1 hora foi completado com água até a marca de 500 cm³ e novamente realizada a pesagem da massa total do conjunto. Para finalizar o processo o agregado foi retirado do frasco e direcionado a estufa a 105°C até massa constante, em seguida foi esfriado a temperatura ambiente e pesado.

A massa específica aparente do agregado seco foi calculada através da equação 1:

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

Onde:

d_1 – massa específica aparente do agregado seco $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

m – massa da amostra seca em estufa (g)

V – volume do frasco (cm^3)

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

Onde o volume de água adicionado ao frasco (V_a) foi obtido através da equação 2:

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

Onde:

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

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

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

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

A massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2) foi calculado de acordo com a equação 3.

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

Onde:

d_2 – massa específica do agregado saturado superfície seca $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

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 massa específica do agregado (d_3) foi determinada através da equação 4:

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

Onde:

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

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)

V – volume do frasco (cm^3)

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

3.2.1.3 Determinação de massa específica do agregado graúdo

O ensaio para determinação da massa específica respeitou a metodologia descrita nas normas ABNT/NBR NM 53 (2009) e ABNT/NBR NM 26 (2009).

Para execução do mesmo, foi necessária uma amostra de 2kg de agregado graúdo submerso em água à temperatura ambiente por aproximadamente 24 horas. Em seguida foi retirado da água e com o auxílio de um pano absorvente secou-se o excesso de água visível. Imediatamente após a secagem pesou-se a amostra no intuito de obter a massa do agregado saturado com superfície seca (m_s). Posteriormente um cesto foi acoplado a balança onde o agregado foi despejado e submerso em água à temperatura de 23°C, registrando-se a massa do agregado em água (m_a). A amostra foi levada à estufa à temperatura de 105°C até massa constante, em seguida foi exposta à temperatura ambiente por cerca de 3 horas para seu resfriamento e o processo foi finalizado com a pesagem final da amostra.

A massa específica do agregado seco foi obtida através da equação 5:

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (5)$$

Onde:

d – massa específica do agregado seco $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

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 massa específica do agregado na condição saturado superfície seca foi dada pela equação 6:

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (6)$$

Onde:

d_s – massa específica do agregado na condição saturado superfície seca $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

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

m_a – massa em água da amostra (g)

A absorção do agregado graúdo foi obtida através da equação 3:

$$A = \frac{m_s - m_a * 100}{m} \quad (7)$$

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)

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

3.2.1.4 Determinação do teor de umidade superficial do agregado miúdo

O teor de umidade superficial é o quociente entre a massa de água aderente à superfície dos grãos do agregado e a massa do agregado na condição saturada de superfície seca. Este dado é fundamental para assegurar a relação água/cimento do concreto ou argamassa (ABNT/NBR 9775, 2011).

O ensaio foi realizado de acordo com as normativas da ABNT/NBR 9775 (2011), que descreve a metodologia para determinar a umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

Primeiramente separou-se uma amostra de 500g do agregado miúdo em estado úmido. Adicionou-se água ao frasco Chapman até atingir a marcação de 200 ml e o deixou em repouso para que a água de sua parede escoasse ao fundo. Posteriormente a amostra foi despejada cuidadosamente, agitando o frasco com movimentos circulares no intuito de eliminar as bolhas de ar.

Após o repouso do conjunto em uma superfície plana e sem vibrações, foi realizada a leitura atingida pela água no frasco. A mesma indica o volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

Logo, o teor de umidade superficial presente no agregado miúdo, expresso em porcentagem de massa de agregado miúdo seco, pode ser obtida através da equação 8:

$$h = \frac{[500 - (v - 200) \times \gamma]}{(v - 700) \times \gamma} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

h – é o teor de umidade superficial, expresso em porcentagem (%)

v – leitura do frasco de Chapman (mL)

γ – Densidade na condição saturada superfície seca do agregado miúdo (g/mL)

3.2.1.5 Determinação da absorção de água pelo agregado miúdo

Para determinar a absorção de água do agregado miúdo foram realizadas adaptações no método utilizado por Bennack (2016). Utilizou-se um molde metálico cilíndrico (9x4,9cm) no intuito de determinar o volume ocupado pelo material. O molde foi preenchido em camadas

com o auxílio do soquete pequeno até sua superfície. Posteriormente o frasco Chapman foi preenchido com água até a marca de 200 ml, onde foi adicionado todo o material que ocupou o molde com o auxílio de um funil. No intuito de garantir total absorção pelas partículas, a leitura do frasco foi realizada 5 dias após o início do ensaio.

Para obter a absorção de água do agregado miúdo foram utilizadas as equações 9 e 10.

$$A_{Ab} = V_{\text{água+agregado}} - V_f \quad (9)$$

$$Ab = \frac{A_{Ab}}{V_{\text{água+agregado}}} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

A_{Ab} – Água ansorvida (cm^3)

$V_{\text{água+agregado}}$ – soma entre o volume inicial de água e o volume do molde (cm^3)

V_f – volume aferido no frasco após 5 dias (cm^3)

Ab – absorção final do agregado miúdo (%)

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 2, os mesmos foram obtidos no trabalho de Bennack (2016), visto que o resíduo é proveniente da mesma empresa.

Segundo Bennack (2018), 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 2: Massa específica do resíduo.

Resíduo	Massa específica (g/cm³)
Cinza de madeira (120°)	2,78
Cinza de madeira (900°C)	3,36

Fonte: Bennack, 2016.

3.2.2.2 Determinação da absorção de água do resíduo

A determinação da absorção de água do resíduo seguiu o método proposto por Bennack (2016). Primeiramente uma amostra de 100g de resíduo foi previamente seca em estufa a 105°C. Em um molde de corpo de prova cilíndrico (5x10cm), adicionou-se o resíduo em camadas que foram devidamente compactadas com o auxílio de um soquete, no intuito de adensar o material, o procedimento foi realizado até que atingisse metade da altura do molde.

Posteriormente verificou-se o volume ocupado pelo resíduo, e a amostra foi totalmente retirada e pesada em balança com resolução de 0,1g. Em um recipiente cilíndrico foi adicionado 200 ml de água em temperatura ambiente onde a amostra foi despejada e devidamente misturada com o auxílio de uma haste de vidro. A diferença volumétrica entre a amostra final e a soma do volume de água com o volume do resíduo compactado separadamente, resultou no volume de água absorvido pelo resíduo.

3.2.2.3 Determinação da distribuição granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica da cinza de madeira, as premissas definidas na ABNT/NBR NM 248 (2003) foram respeitadas. As amostras foram ensaiadas de maneira semelhante à descrita no item 3.2.1.1 Determinação da distribuição granulométrica de agregados, considerando que as cinzas estariam substituindo parcialmente o agregado miúdo. Desta forma, determinou-se o módulo de finura e o diâmetro máximo das partículas do resíduo.

3.2.3 Dosagem do concreto

Inicialmente fez-se o concreto de referência sem adição de cinza, para a partir deste realizar a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo, onde foram substituídos 5 e 10% de areia por cinza de madeira. A porcentagem a ser substituída foi escolhida de acordo com os resultados e sugestões propostos por Nienkötter (2018).

A dosagem do CCR baseou-se na recomendação dada por TRICHÊS (1993), conforme equação 11.

$$C_c = \frac{1000 - V}{\frac{1}{MEc} + \frac{1}{MEag} + \frac{h(1 + m)}{100}} \quad (11)$$

Onde:

C_c – Consumo de cimento da mistura $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

V – Volume de vazios na mistura (L)

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

h – Teor de umidade da mistura (%)

$ME_{cimento}$ – Massa específica do cimento $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

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

A dosagem referência considerada no estudo possui um consumo de 100 kg/m³ de cimento e umidade de 7% sobre a massa total seca. A umidade foi escolhida em função da curva de umidade obtida em literaturas anteriores. As outras duas misturas de concreto com substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo foram elaboradas com a mesma dosagem.

3.2.4 Preparação dos corpos de prova

Primeiramente o agregado miúdo, graúdo e a cinza foram colocados na estufa a 105° C por 24 horas e posteriormente armazenados em bombonas até atingirem temperatura ambiente. Posteriormente os componentes foram separados e pesados para realização do concreto. A preparação dos corpos de prova para todos os ensaios seguiu as seguintes etapas: mistura, consistência, moldagem e acondicionamento.

a) Mistura dos componentes

O concreto foi produzido em betoneira e os materiais foram adicionados na seguinte sequência: agregado graúdo, cimento, agregado miúdo e água, para os corpos de prova de referência. Os corpos de prova que possuíam substituição de resíduo, respeitaram a mesma

sequência, entretanto o resíduo foi adicionado após o agregado miúdo e antes da água. Misturou-se por cerca de 5 minutos até total homogeneização da mistura.

b) Consistência

Após elaboração de cada mistura, sendo elas o concreto referência, substituição do agregado miúdo pelo resíduo de cinza de madeira em 5% e 10%, realizou-se o ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, *slump test*, respeitando a norma ABNT/NBR NM 67 (1998).

O processo consiste primeiramente em umedecer o molde e a placa de base e posicionar os mesmos de forma que o conjunto fique estável. Após o término da mistura, o concreto foi despejado rapidamente em três camadas, cada camada possuía aproximadamente um terço da altura do molde compactado e foram compactadas com 25 golpes cada, de modo uniforme por toda seção. Em seguida retirou-se o molde cuidadosamente na direção vertical para medir a diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado. Toda a operação foi realizada em um intervalo de 150 segundos, tempo limite determinado por norma.

O ensaio de tronco de cone (*Slump Test*), é realizado para assegurar que a consistência do concreto esteja adequada. O CCR precisa garantir a umidade ideal para uma boa compactação e a consistência seca que suporte o peso do rolo vibratório sem permitir a aderência dos grãos no equipamento. Segundo Silva (2006), o CCR é um concreto “seco”, que possui *slump* zero, e diferencia-se do concreto convencional principalmente em sua consistência e trabalhabilidade.

c) Moldagem

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.

Foram produzidos quinze corpos de prova de cada formulação, totalizando 45 corpos de prova. Logo após a moldagem, os mesmos foram cobertos por plásticos, no intuito de evitar a evaporação de água.

d) Acondicionamento

Após um intervalo de 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e imersos em um tanque com água não corrente saturada em cal, onde foram mantidos até o momento do ensaio de resistência a compressão.

3.2.5 Ensaio de resistência à compressão simples

A resistência à compressão axial foi realizada de acordo com a norma ABNT/NBR 5739 (2007), os corpos de prova foram rompidos aos 7 e 28 dias em uma prensa hidráulica apresentada na Figura 9.

Figura 9: Prensa utilizada no ensaio de compressão simples.



Fonte: Autor, 2018.

Os corpos de prova foram retirados do tanque e na sequência rompidos. O resultado de resistência à compressão axial foi calculado através da equação 12.

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

Onde:

f_c – Resistência a compressão (MPa)

F – Carga máxima obtida no ensaio (Kgf)

D – diâmetro do corpo de prova (mm)

3.2.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral seguiu a NBR 7222 (1994) e foi realizado em corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm). Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias em uma prensa universal de tração, compressão e flexão, conforme a Figura 10.

Figura 10: Prensa utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autor, 2018.

Antes de serem ensaiados os corpos de prova foram pesados e medidos. Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral foi empregada a equação 13.

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times L} \quad (13)$$

Onde:

$f_{t,D}$ – Resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F – Carga máxima obtida no ensaio (N)

d – diâmetro do corpo de prova (mm)

L – altura do corpo de prova (mm)

3.2.7 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Para determinar as propriedades físicas do concreto respeitou-se os parâmetros definidos na NBR 9778 (2005) e NBR 9779 (2012). Primeiramente amostras dos corpos de prova rompidos aos 28 dias foram coletadas e colocadas na estufa à 105° por um período de 24 h. Posteriormente as mesmas foram pesadas (M_s) e submersas em água, à temperatura ambiente, por 72h. Em seguida registrou-se o peso dos corpos de prova imersos em água (M_i). Por fim os fragmentos foram secos superficialmente com o auxílio de um papel toalha e pesados novamente (M_{sss}).

Através dos valores resultantes das pesagens foi possível determinar as propriedades físicas do concreto utilizando as equações 14, 15 e 16:

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_i} \quad (15)$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100 \quad (16)$$

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

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas utilizadas e na caracterização do concreto, assim como a discussão sobre o uso da cinza de madeira em substituição a areia.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Determinação da distribuição granulométrica

Foram realizados ensaios de distribuição granulométrica para areia média e para brita 0 utilizadas no estudo do concreto. Foram obtidas informações indicando o módulo de finura e o diâmetro máximo da areia média, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

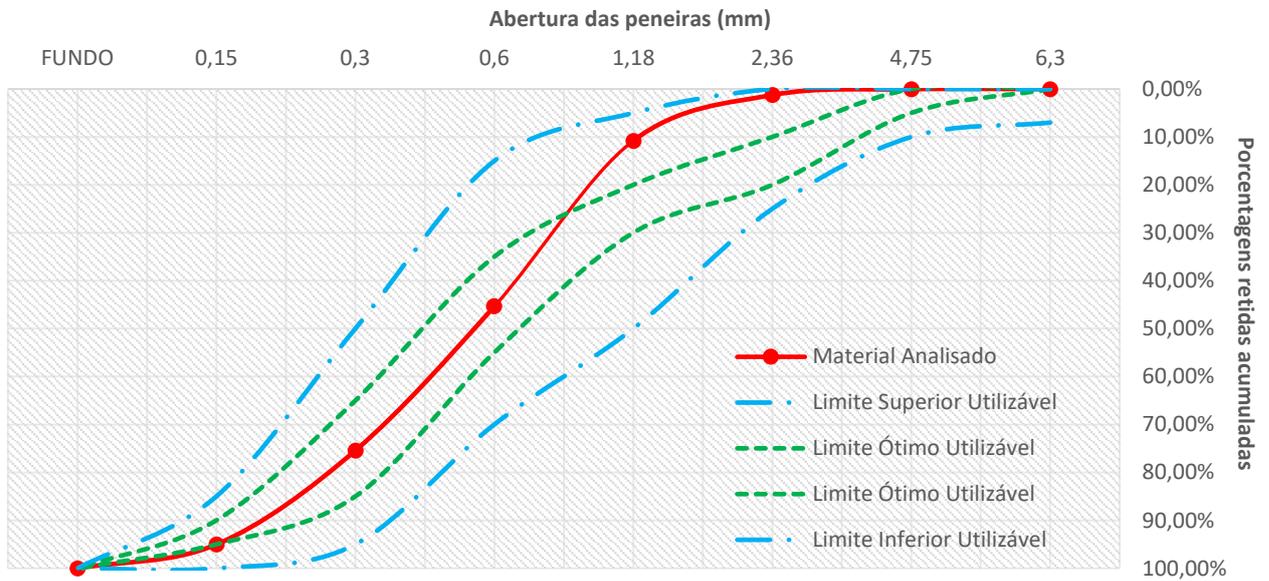
Tabela 3: Resultado de granulometria do agregado miúdo.

Material	Módulo de finura	Diâmetro máximo (mm)
Areia média	2,28	2,36

Fonte: Autor, 2018.

Com os dados obtidos no ensaio foi possível traçar a curva granulométrica da areia média (Gráfico 1) sendo possível observar que todo o material analisado se encontra no limite utilizável e cerca de 70% dentro do limite ótimo.

Gráfico 1: Curva granulométrica da areia média.



Fonte: Autor, 2018.

O agregado graúdo tem módulo de finura e diâmetro máximo de partículas apresentado na Tabela 4.

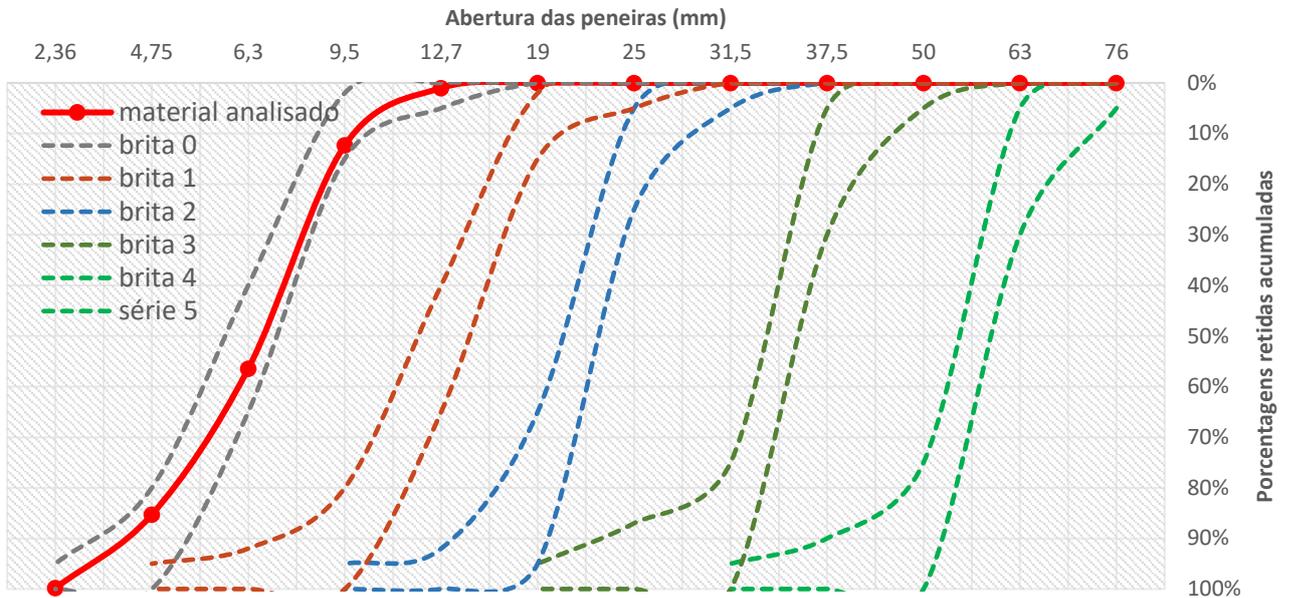
Tabela 4: Resultado de granulometria do agregado graúdo.

Material	Módulo de finura	Diâmetro máximo (mm)
Brita	6,42	12,7

Fonte: Autor, 2018.

Através dos valores obtidos no ensaio é possível traçar a curva granulométrica do material analisado e compara às curvas granulométricas de classificação de agregados graúdos. No Gráfico 2, pode-se verificar que a brita utilizada na elaboração do concreto foi classificada como brita 0.

Gráfico 2: Curvas granulométricas de classificação de agregados graúdos.

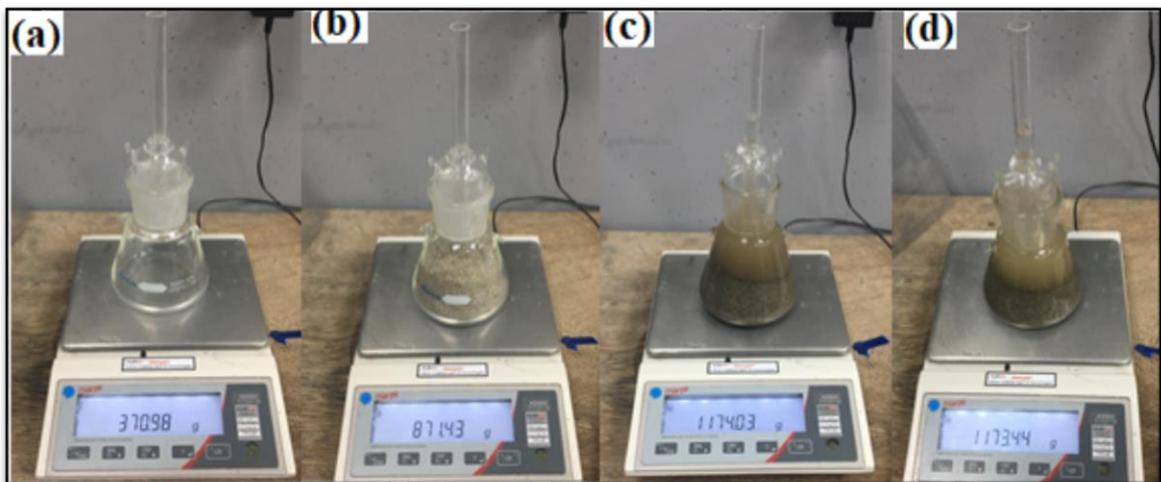


Fonte: Autor, 2018.

4.1.2 Determinação da massa específica

A Figura 11 ilustra as pesagens realizadas no ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo.

Figura 11: Pesagem do frasco (a); Pesagem do conjunto (b); Pesagem do conjunto mais água (c); Pesagem após estufa (d).



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados obtidos de massa específica para o agregado miúdo, estão demonstrados na Tabela 5.

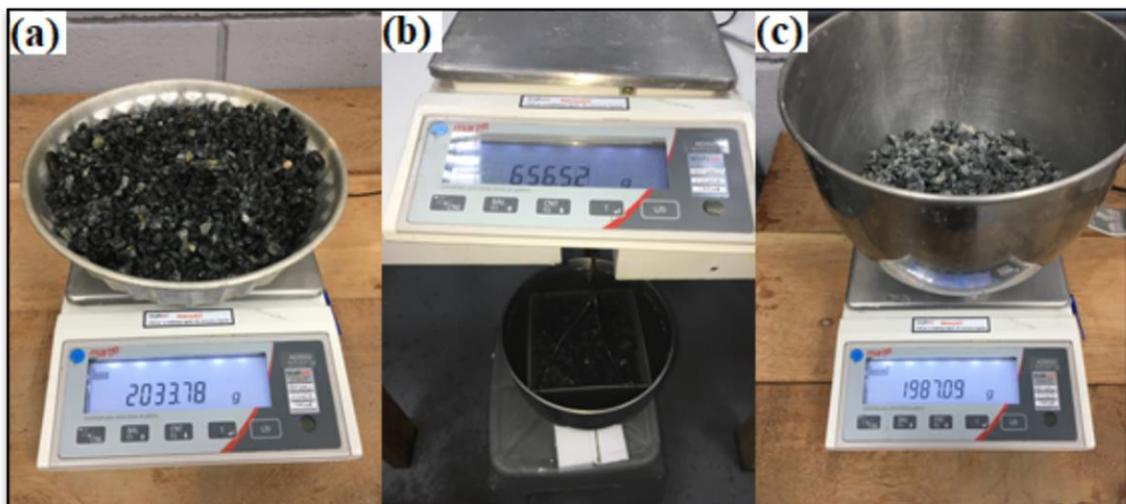
Tabela 5: Massa específica do agregado miúdo.

Propriedade	Areia média (g/cm ³)
Massa específica aparente do agregado seco (d1)	2,45
Massa específica agregado saturado superfície seca (d2)	2,53
Massa específica aparente	2,64

Fonte: Autor, 2018.

As pesagens realizadas durante o ensaio de determinação de massa específica do agregado graúdo são ilustradas na Figura 12.

Figura 12: Pesagem do agregado saturado com superfície seca (a); Pesagem do agregado imerso em água (b); Pesagem do agregado seco em estufa (c).



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados de massa específica e absorção de água do agregado graúdo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Massa específica do agregado graúdo.

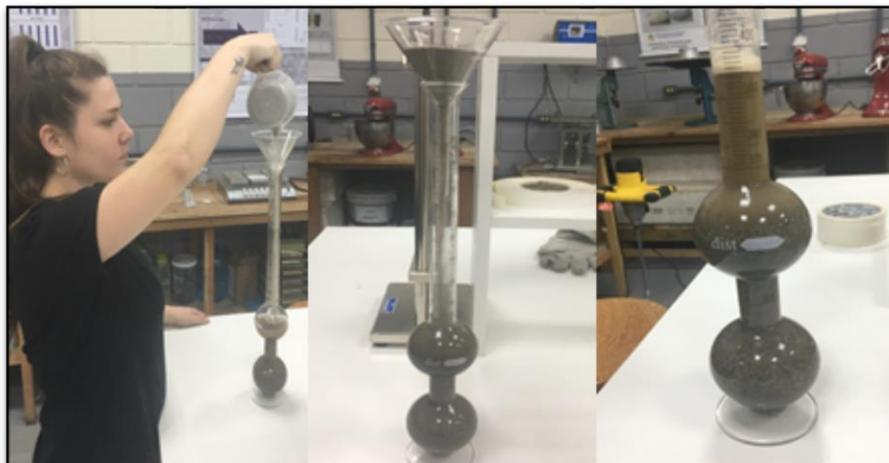
Propriedade	Areia média (g/cm ³)
Massa específica aparente do agregado seco (d1)	2,69
Massa específica agregado saturado superfície seca (d2)	2,76
Massa específica aparente	2,87
Absorção	2,35

Fonte: Autor, 2018.

4.1.3 Determinação do teor de umidade do agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na produção do concreto foi totalmente seco antes da realização da mistura, e, portanto, a umidade presente na amostra não precisou ser descontada para manter a relação água-cimento. A Figura 13 ilustra as etapas necessária para realização do ensaio.

Figura 13: Etapas para realização do ensaio.



Fonte: Autor, 2018.

O resultado do teor de umidade da areia média foi apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Teor de umidade.

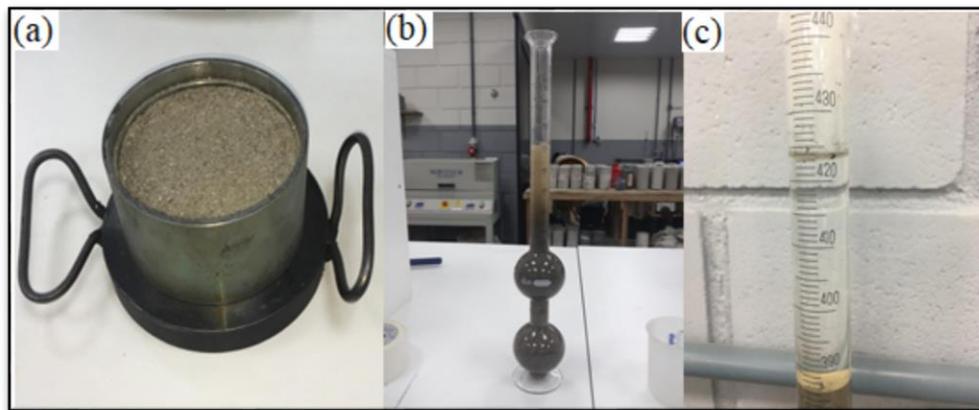
Agregado miúdo	Teor de umidade (%)
Areia média	2,51

Fonte: Autor, 2018.

4.1.4 Determinação da absorção de água pelo agregado miúdo

A Figura 14 ilustra os procedimentos realizados no ensaio.

Figura 14: Molde cilíndrico preenchido (a); Frasco Chapman em repouso (b); Leitura após 5 dias (c).



Fonte: Autor, 2018.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água pelo agregado miúdo.

Tabela 8: Absorção de água.

Agregado miúdo	absorção (%)
Areia média	18,16

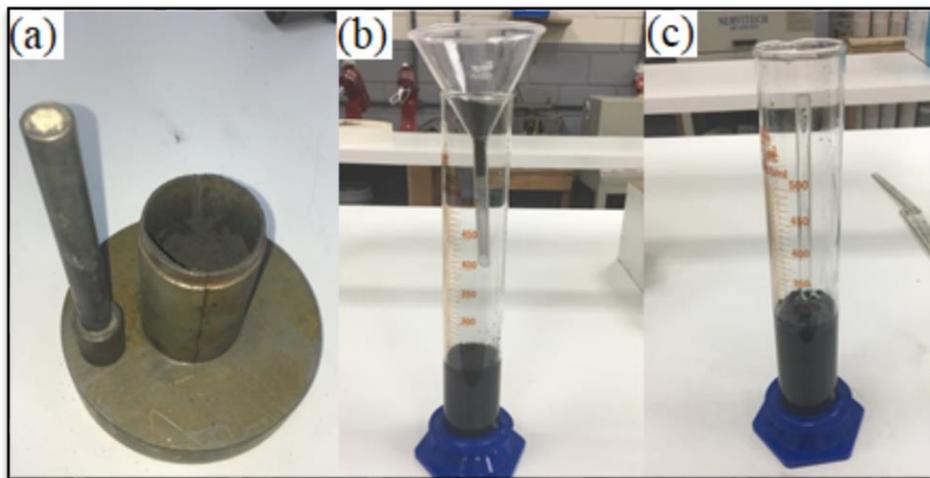
Fonte: Autor, 2018.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

4.2.1 Determinação da absorção de água

. É importante ressaltar que valores elevados de absorção de água influenciam negativamente na trabalhabilidade do concreto fresco, visto que se torna necessário adicionar maiores quantidades de água para alcançar uma mesma trabalhabilidade, fato este que pode implicar em uma redução na resistência do concreto. A Figura 15 ilustra algumas etapas realizadas no ensaio.

Figura 15: Molde com material adensado (a); Frasco sendo preenchido (b); Mistura do conjunto (c).



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos neste ensaio e representam a capacidade do resíduo em absorver água.

Tabela 9- Absorção do resíduo.

Resíduo	Absorção (%)
Cinza de madeira	31,7

Fonte: Autor, 2018.

Visto que a absorção de água do resíduo é 42,71% maior que do agregado miúdo, compensou-se adicionando mais água à mistura no intuito de manter a relação água/cimento definida na dosagem.

4.2.2 Determinação da distribuição granulométrica

Os resultados de módulo de finura e diâmetro máximo das partículas obtidos no ensaio de distribuição granulométrica da cinza estão apresentados na Tabela 10.

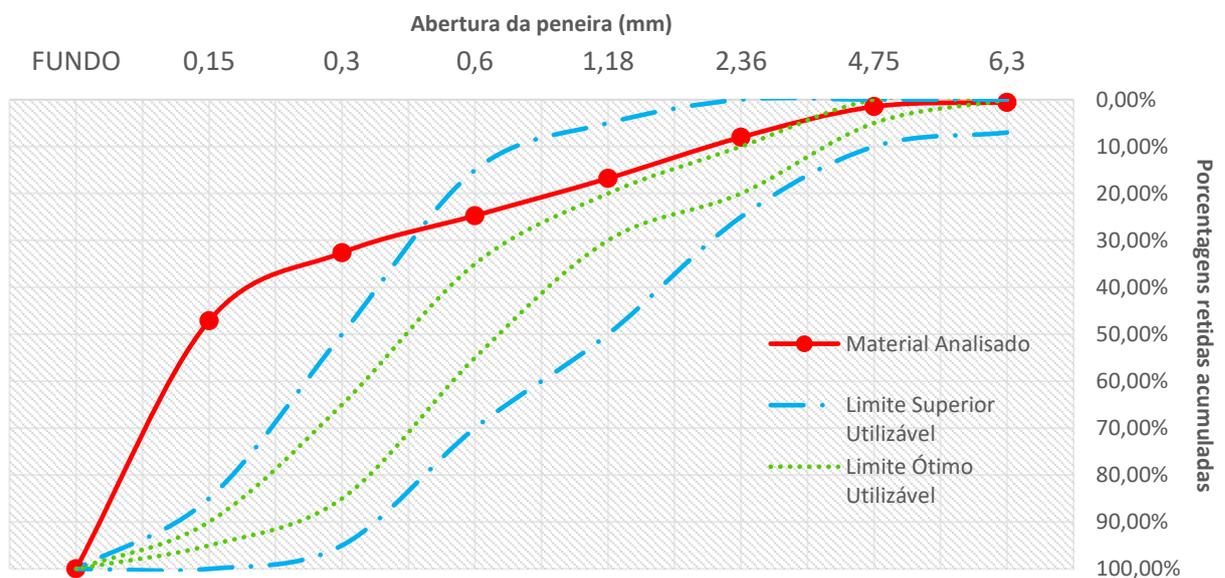
Tabela 10: Resultado de granulometria do resíduo.

Material	Módulo de finura	Diâmetro máximo (mm)
Cinza	1,31	4,75

Fonte: Autor, 2018.

Utilizando as informações obtidas no ensaio foi possível traçar o Gráfico 3, referente a curva granulométrica da cinza de madeira. Através da curva granulométrica observa-se que a mesma possui uma distribuição granulométrica semelhante a uma areia fina com grande quantidade de finos.

Gráfico 3: Curva granulométrica do resíduo.



Fonte: Autor, 2018.

4.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

4.3.1 Dosagem do concreto

O valor de f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão) almejado no estudo foi de 5 MPa aos 7 dias. A dosagem de referência e com substituição parcial da areia pela cinza em diferentes proporções respeitou a dosagem apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Dosagem utilizada.

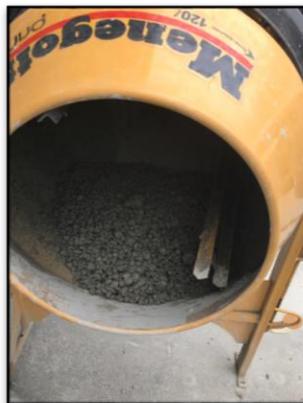
Concreto	Cimento (Kg)	Areia média (Kg)	Resíduo (Kg)	Brita 0 (Kg)
Referência	1	10,85		10,85
Adição de resíduo (5%)	1	10,31	0,54	10,85
Adição de resíduo (10%)	1	9,77	1,085	10,85

Fonte: Autor, 2018.

4.3.2 Preparação dos corpos de prova

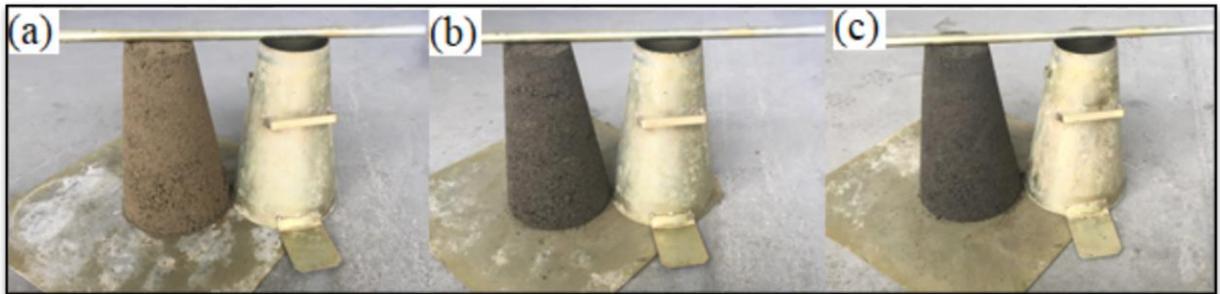
A Figura 16 ilustra o concreto referência no estado fresco. Os resultados obtidos no *slump test*, constatando o *slump zero* (conforme previsto pela literatura), estão apresentados na Figura 17.

Figura 16: Concreto referência no estado fresco.



Fonte: Autor, 2018.

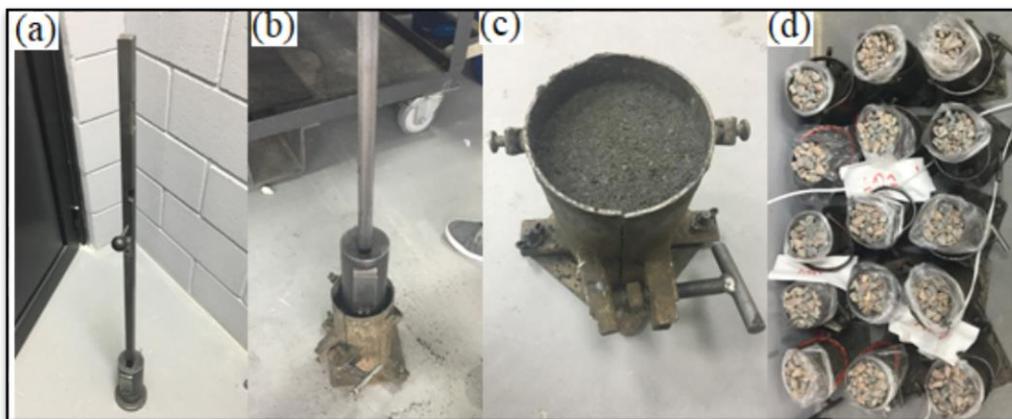
Figura 17: Abatimento das formulações: Referência (a); 5% de cinza (b); 10% de cinza (c).



Fonte: Autor, 2018.

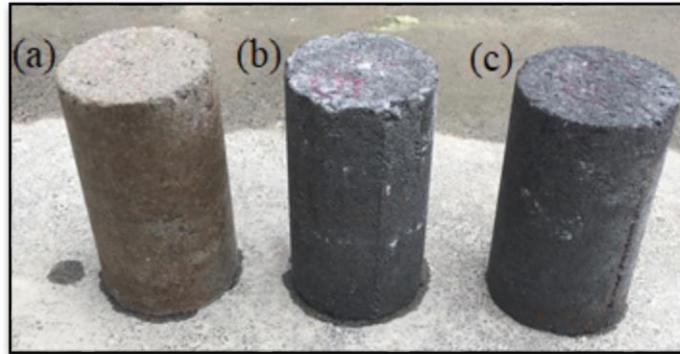
As figuras 18, 19 e 20, apresentam os procedimentos realizados durante a moldagem do concreto, após o desmolde dos corpos de prova e durante o acondicionamento dos mesmos, respectivamente.

Figura 18: Soquete (a); Compactação da mistura (b); Corpo de prova compactado (c); Corpos de prova cobertos (d).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 19: Corpos de prova: Referencia (a); 5% de cinza (b); 10% de cinza (c).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 20: Corpos de prova imersos em água com cal.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.3 Ensaio de resistência à compressão axial

Segundo o DNIT/056 (2013) a resistência característica à compressão 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 12.

Tabela 12: Resistência à compressão do concreto aos 7 dias.

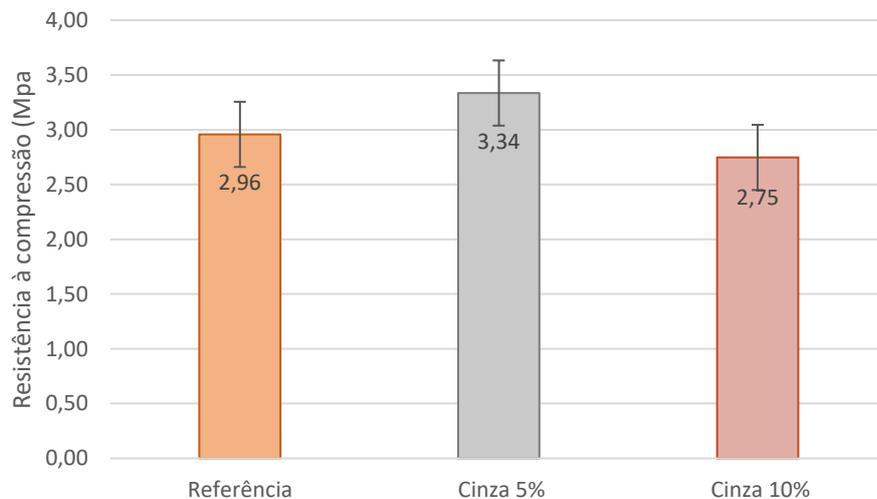
Corpo de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)
Referência	2,99	3,09	2,72	3,03	2,96
Cinza 5%	3,10	3,26	3,43	3,55	3,34
Cinza 10%	2,68	3,28	2,56	2,47	2,75

Fonte: Autoral, 2018.

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 a 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 susceptível 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 média e seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 4: Resistência à compressão do concreto aos 7 dias.



Fonte: Autor, 2018.

Aos 7 dias é possível concluir um crescimento de 11,31% na resistência média na dosagem com 5% de adição do resíduo comparado à referência. Entretanto, com adição de 10% de cinza a resistência apresentou uma queda de 7,1%.

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos de compressão axial aos 28 dias.

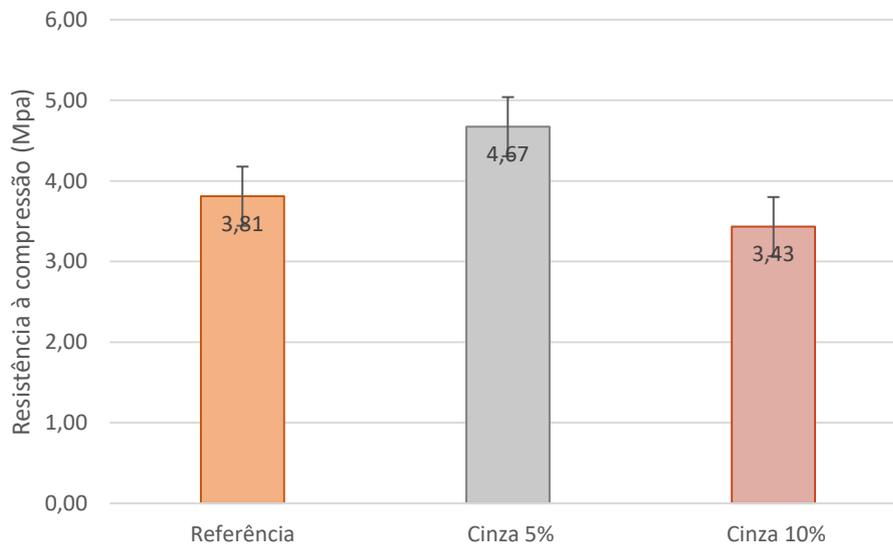
Tabela 13: Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

Corpo de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP2 (MPa)	Média (MPa)
Referência	3,58	4,14	3,81	3,71	3,81
Cinza 5%	4,40	4,84	4,60	4,85	4,67
Cinza 10%	3,63	3,10	3,55	3,45	3,43

Fonte: Autor, 2018.

Com os dados de resistência axial média aos 28 dias foi traçado o gráfico 5.

Gráfico 5: Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2018.

Aos 28 dias é possível concluir um crescimento de 18,45% na resistência média da dosagem com 5% de adição do resíduo em comparação à referência. No entanto, semelhante aos resultados de compressão em 7 dias, a resistência da dosagem com 10% de adição obteve uma queda de 9,9%.

Através dos gráficos é possível constatar que a dosagem com utilização do resíduo em substituição ao agregado miúdo em 5 %, obteve valor de resistência a compressão média acima do valor obtido no concreto referência, tanto aos 7 quanto aos 28 dias.

Uma possível explicação para o aumento de resistência com 5% de resíduo, segundo observações de Bennack (2016), é o aumento de finos proveniente do resíduo que, apesar de não ser considerado um material pozolânico, possui grandes quantidades de sílica e alumina em sua composição.

Outra possível explicação, com base nas observações de Silva (2006), é que a adição da cinza nas misturas de CCR resulte em um empacotamento granulométrico da mistura, permitindo um melhor rearranjo entre os grãos que ocupam os vazios presentes no concreto devido ao baixo consumo de cimento, melhorando assim a interação da interface argamassa/agregado e proporcionando uma melhor estabilidade à mistura.

Entretanto quando se aumenta o percentual de substituição do agregado miúdo pelo resíduo a resistência tende a cair, uma vez que valores elevados de cinza afetam a adesão entre as partículas.

Ainda podemos considerar que devido a necessidade de se obter uma massa com características secas, foram utilizados baixos teores de água na produção do concreto, fato este que é diretamente afetado quando ocorre a substituição em grandes quantidades da areia pelo resíduo, uma vez que o mesmo possui altos teores de finos e conseqüentemente uma alta capacidade de absorção de água, podendo vir a comprometer a reação de hidratação dos compostos do cimento.

4.3.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 13.

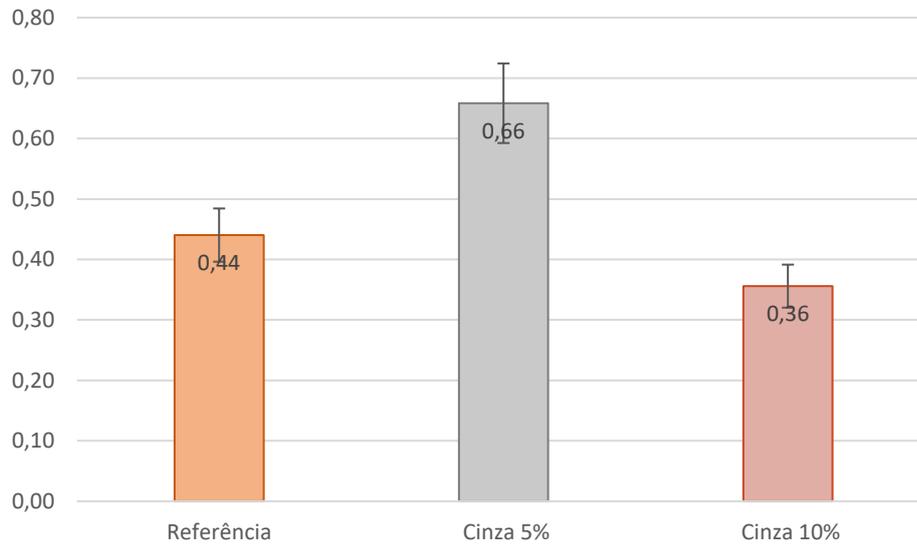
Tabela 14: Resistência à tração por compressão diametral.

Corpo de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)
Referência	0,46	0,45	0,43	0,42	0,44
Cinza 5%	0,62	0,72	0,67	0,62	0,66
Cinza 10%	0,33	0,39	0,39	0,31	0,36

Fonte: Autor, 2018.

O gráfico 6 apresenta a média de resistência à tração por compressão diametral e seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 6: Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados obtidos no ensaio mostraram-se semelhantes aos obtidos no ensaio de compressão axial, da mesma maneira que o anterior a mistura com 5% de adição de cinza de madeira em substituição a areia obteve melhores resultados que a mistura referência. O resultado de tração por compressão diametral média da dosagem com 5% de adição de resíduo obteve um crescimento de 33,12% em relação à referência. Entretanto a dosagem com 10% de adição sofreu um decréscimo de 19,17%.

De acordo com Paulon e Monteiro (1991, p. 43 apud Sachet, 2012, p. 92), “no concreto a pasta de cimento forma uma auréola em torno do agregado, onde a cristalização dos hidratados é diferente da existente na mesma pasta, fora dessa zona de transição. Essa auréola ou zona de transição é o local que apresenta as características mais fracas do concreto”. A zona de transição é uma zona com relação água/cimento mais elevada e de menos coesão, onde a fissura se propaga com maior facilidade. Em concretos secos, onde a quantidade de pasta não é suficiente para cobrir todos os agregados de maneira homogênea e completa, não se pode afirmar que a auréola se forme, entretanto, constata-se uma zona ainda maior de fragilidade na transição entre agregado e pasta de cimento (SACHET, 2012).

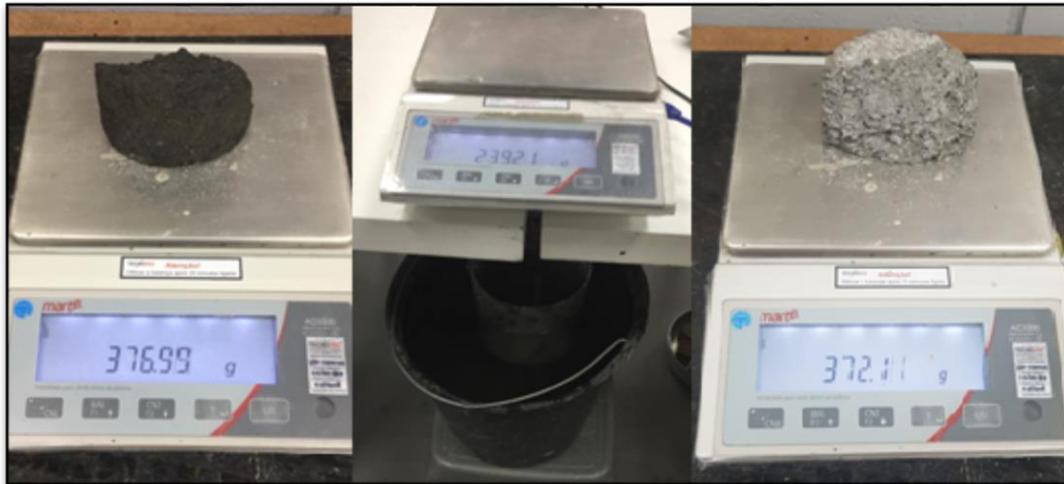
Sendo assim, nas misturas em que a porcentagem de resíduo em substituição ao agregado miúdo é elevada, a queda de resistência pode ser atribuída a zona de transição, pois a

mesma necessita uma relação água/cimento mais alta e pode ter sido prejudicada devido à alta absorção de água pela cinza, os hidratados podem não se cristalizar devido à baixa quantidade de água, e por mais que tentemos compensar a absorção de água da cinza na mistura, a relação água/cimento pode ter sido afetada.

4.3.5 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

O ensaio foi realizado a partir de três amostras de cada corpo de prova. A Figura 21 ilustra as pesagens realizadas no ensaio.

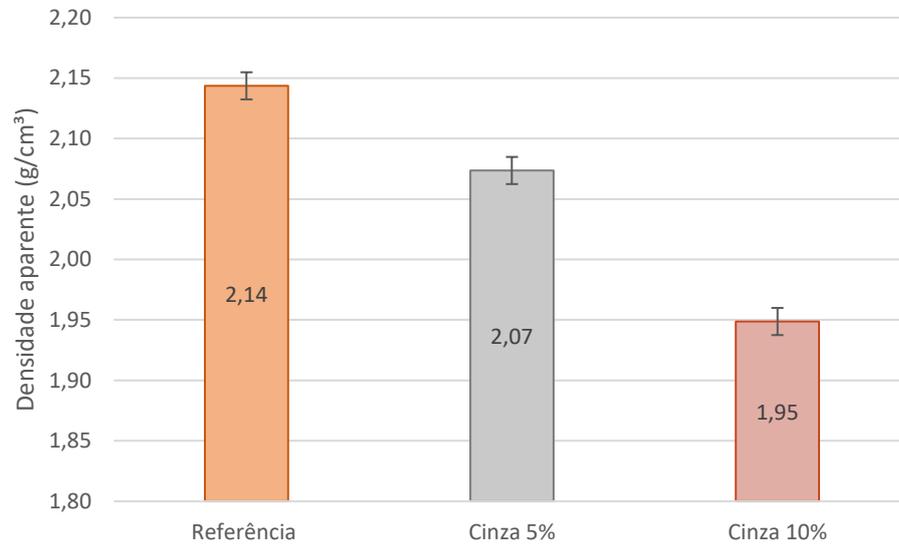
Figura 21: Pesagens realizadas no ensaio.



Fonte: Autor, 2018.

O gráfico 7 apresenta os valores de densidade aparente e desvio padrão das formulações analisadas.

Gráfico 7: Densidade aparente.

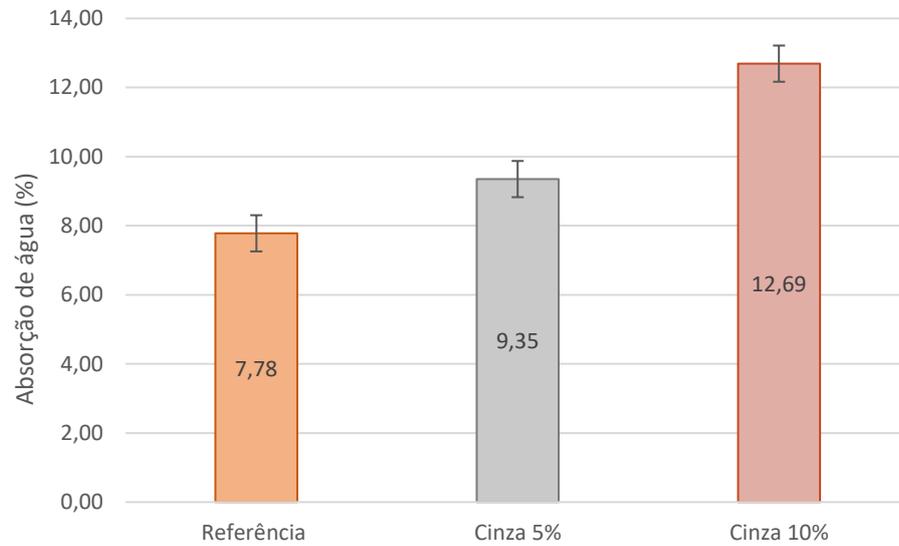


Fonte: Autor, 2018.

Através da análise das informações é possível concluir que a mistura de referência possui maior densidade aparente se comparada às misturas contendo o resíduo. Observa-se que com 5% de adição de cinza ocorre uma redução de 3,27% na densidade aparente. Entretanto aumentando-se a quantidade de resíduo para 10%, a redução da densidade aparente é ainda maior, decresce 9,09%. Segundo Rossignolo (2008), o tipo e a granulometria do agregado afetam diretamente a densidade e a resistência do concreto, quanto mais fina a granulometria utilizada na mistura, menor sua densidade aparente.

A densidade aparente é inversamente proporcional à absorção de água (Gráfico 8), quanto maior a absorção de água, menor a densidade aparente. A redução ocorre em função da maior absorção de água pela cinza, visto que a água presente evapora, formando vazios.

Gráfico 8: Absorção de água.

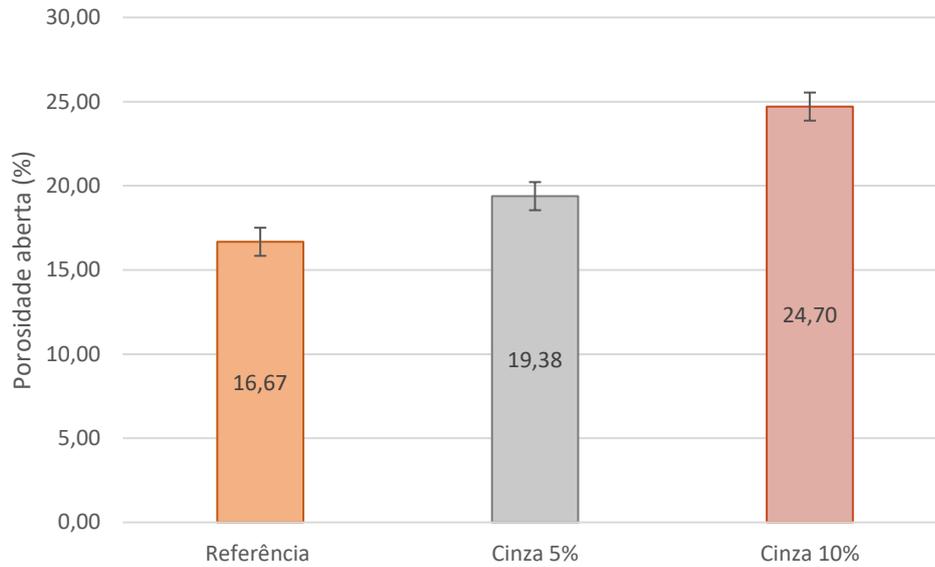


Fonte: Autor, 2018.

Através do gráfico 8 é possível observar um crescimento na absorção de água em função do aumento da quantidade de resíduo na mistura. Constata-se um aumento de 20,18% e 63,13% na absorção de água nas misturas com 5% e 10% de cinza respectivamente, em comparação à mistura referência.

Fato este que já era esperado visto que foi constatado no item 4.2.1 que a cinza absorve 13,53% a mais de água que a areia. Uma possível justificativa para maior absorção de água em função do crescimento da porcentagem de cinza, é sua granulometria, visto que quanto menor o módulo de finura do agregado maior quantidade de água necessária para obter a hidratação mínima do concreto. O Gráfico 9 apresenta a porosidade aberta das misturas.

Gráfico 9: Porosidade aberta do CCR.



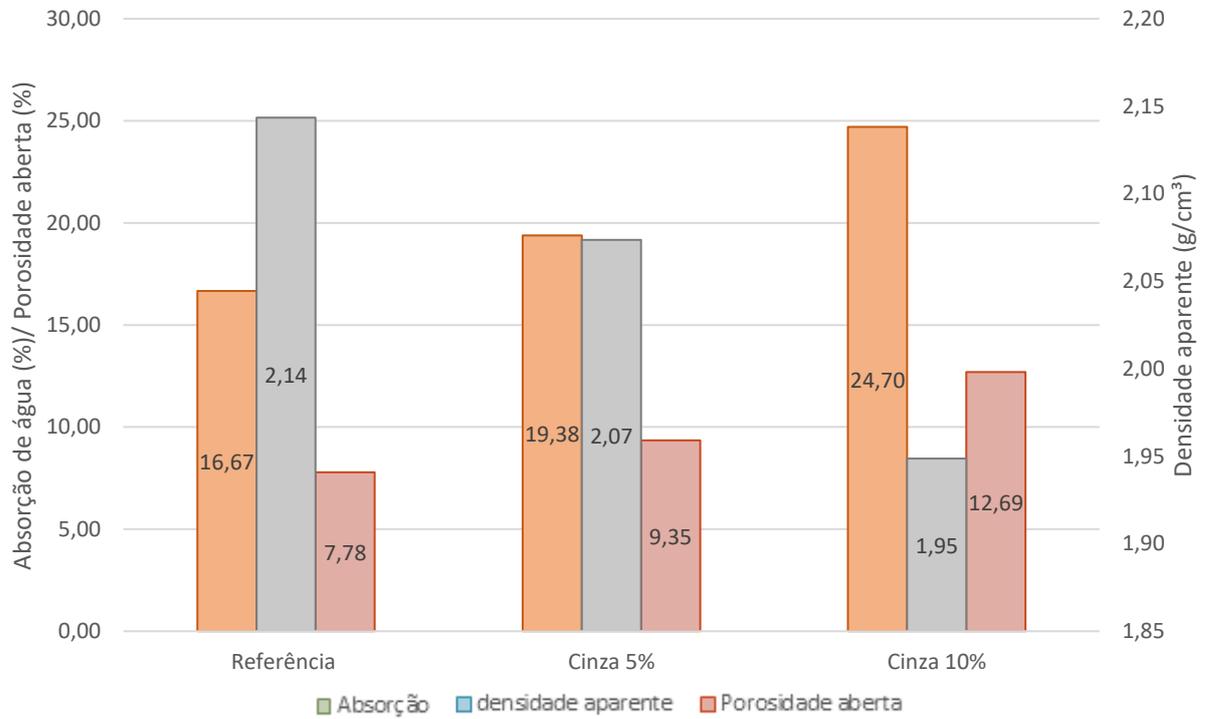
Fonte: Autor, 2018.

Através das informações apresentadas observa-se um crescimento de 16,26% e 48,18% na porosidade aberta das misturas com adição do resíduo em relação à referência. O aumento da porosidade pode ocorrer em função da maior absorção de água do resíduo se comparado ao agregado miúdo da mistura, logo, a maior quantidade de água absorvida acarreta maior número de vazios no concreto endurecido, gerando assim maior número de poros.

A porosidade é uma propriedade física que normalmente diminui a resistência do concreto, entretanto o aumento de 16,26% na porosidade da mistura com 5% de cinza em relação à referência não foi suficiente para que o concreto apresentasse menor resistência a compressão simples.

O Gráfico 10 apresenta a relação entre as três propriedades: densidade aparente, porosidade aberta e absorção.

Gráfico 10: Absorção x Porosidade x Densidade aparente.



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados indicam que quanto maior a porosidade aberta, maior a absorção de água e menor a densidade aparente. Portanto podemos afirmar que a densidade aparente dos concretos estudados é inversamente proporcional às duas outras propriedades.

5 CONCLUSÕES

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 resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral apresentaram melhores resultados no concreto com 5% de resíduo. Assim como evidenciado por Silva (2006) e Bennack (2016), o concreto com adição de cinza de madeira, em baixas quantidades, aumentou a resistência da mistura. Pode-se afirmar que, apesar de o resíduo não ser classificado como pozolânico, o mesmo apresenta uma composição química que influencia diretamente na resistência do concreto. A granulometria do resíduo também influencia no empacotamento granulométrico da mistura, onde um melhor rearranjo entre os grãos pode vir a aumentar a resistência da mesma.

Entretanto, quando adicionam-se maiores porcentagens do resíduo, ocorre um aumento na absorção e porosidade aberta do concreto, fato justificado devido a cinza absorver cerca de 42,71% de água a mais que a areia média, gerando assim um aumento considerável de poros ao concreto. Segundo Botelho e Ferraz (2016), após a secagem, as misturas com adição de resíduos em grandes quantidades podem gerar poros, espaços e até fissuras no concreto, influenciando negativamente na resistência do mesmo.

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 torna-se cada vez mais difícil. Desta forma, a dificuldade de ligação das partículas interfere diretamente na resistência mecânica do concreto, visto que a transferência de carga se dá por meio dessas ligações (HARRINGTON, 2010).

De uma maneira geral, analisando os resultados obtidos pode-se afirmar que a cinza de madeira em baixas porcentagens, se mostrou um agregado miúdo muito competitivo, influenciando positivamente e diretamente no comportamento mecânico do CCR, caracterizando-o como um material alternativo de boa qualidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a variação dos resultados realizando a moagem do resíduo alterando assim seu módulo de finura;
- Traçar a curva de umidade ótima do CCR;
- Alterar a dosagem do estudo, no intuito de alcançar as resistências mínimas definidas por norma;
- Realizar ensaio à compressão axial aos 90 dias de vida do CCR;
- Efetuar a microscopia eletrônica para visualizar o comportamento da cinza no CCR.

REFERÊNCIAS

ABREU, José Vanderlei de. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

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 - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

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

_____. **NBR 7222**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9775**: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

_____. 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.

ARAÚJO, Marcelo Almeida et al. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 10, n. 2, p.187-196, nov. 2016.

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.

BOTELHO, M. H. C.; FERRAZ, N.N. **Concreto Armado - Eu te amo – Vai para obra.** 1 ed. São Paulo: Bluncher, 2016.

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.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias não duram?** 2017. Disponível em: <<http://anut.org/wp-content/uploads/2017/10/Pavimentos.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

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

FACHIN, O. **Fundamentos da Metodologia.** 5. ed. São Paulo: Saraiva, 209 p. 2006.

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. intrans. Project Reports. Disponível em: https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102/. Acesso em: 11 nov. 2018.

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.

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.

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**. 1. Ed. Ottawa, Canada, 1996.

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.

MEHTA, P.K. ; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON, 2008, 674p.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA, A. P. N.; **Avaliação de concreto de cimento portland contendo resíduos de PET**. Revista Matéria, Laguna, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

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.

PADULA, Raphael. **Infra-Estrutura 1: Transportes: Fundamentos e propostas para o Brasil**. Brasília: Pensar O Brasil, 2008. 215 p.

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

RICCI, Gino. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** São Paulo, PINI, 2008.

SACHET, Taís. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos.** 2012. 186 f. Tese (Doutorado) - Programa de doutorado em Engenharia, Centro Tecnológico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SALINAS, Javier Eduardo Molina. **Adición de ceniza de cascarilla de arroz en hormigón compactado con rodillo.** 2002. 78 f. Tese (Doutorado) – Programa de doutorado em Engenharia Civil, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, 2002.

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

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.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **O sindicato.** Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <www.snic.org.br>. Acesso em: 04 junho. 2018

TOFFOLO, Rodrigo Vicente Machado. **Pavimentos sustentáveis.** 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.

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.

WIECHETECK, Marcelo. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos.** 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2018.