

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

YOHANA DOS SANTOS LEAL NIENKÖTTER

ADIÇÃO DE CINZA DE MADEIRA EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO
COMO SUB-BASE DE PAVIMENTO RÍGIDO

Joinville

2018

YOHANA DOS SANTOS LEAL NIENKÖTTER

ADIÇÃO DE CINZA DE MADEIRA EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO
COMO SUB-BASE DE PAVIMENTO RÍGIDO

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

Orientadora: Valéria Bennack, Prof^a. Ma.

Joinville

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida e por ter renovado meu ânimo a cada manhã.

Agradeço às minhas mães, Adriana e Zenir, por todo suporte financeiro e emocional ao longo desses anos de luta. Sou grata por todo o cuidado, amor, atenção e carinho que sempre tiveram comigo. Com vocês adquiri valores que levarei em cada passo que eu der. Não poderia deixar de citar aqui Alair e Karol, tia/mãe e minha irmã que estiveram sempre ao meu lado, de braços abertos, me apoiando em toda a minha vida.

Agradeço ao meu melhor amigo, minha paixão, meu porto seguro e meu grande amor Maiko. Obrigada por todo o apoio, por estar sempre ao meu lado incentivando meus sonhos, suportando minhas angústias com abraços, ternura e paciência. Sem você eu não estaria aqui, estiveste comigo nos momentos mais alegres, mais tristes e mais difíceis. És meu maior e melhor presente.

À minha orientadora Valéria Bennack meu muito obrigada pelo conhecimento compartilhado e por ter transmitido calma em meio aos meus desesperos.

Aos colegas de laboratório que acompanharam e auxiliaram nesse período, em especial ao Felipe Souza por ter cedido parte do seu material para que eu realizasse meus experimentos.

Sou grata às amigas Kymberly, Pérside, Jully, Laís, Juliana, e aos demais amigos que fiz durante a graduação, por compartilharem comigo essa árdua jornada e terem me dado força nas diversas vezes que pensei em desistir. Obrigada também à Beatriz e demais amigas que deixei em Tubarão, que mesmo de longe sempre torceram pelo meu bem.

Agradeço às empresas Supermix, Perville, Berneck e Geoforma, que prontamente cederam espaço, contribuíram com material e utensílios indispensáveis para a realização do trabalho.

Aos meus familiares e também aos familiares de meu esposo deixo meus agradecimentos, por terem acreditado em mim e pelas constantes palavras de incentivo.

Agradeço a CAPES pela oportunidade de intercâmbio, pelos aprendizados e experiências vivenciadas, lá conheci pessoas maravilhosas, entre eles, meu agradecimento especial ao meu amigo do peito Ramon, um anjo em minha vida.

RESUMO

No cenário nacional observa-se uma crescente demanda por infraestrutura da malha rodoviária, bem como a necessidade de métodos mais eficientes tanto do prisma econômico, quanto ambiental. Este trabalho busca estudar a viabilidade de aplicação de um resíduo sólido urbano, a cinza de madeira, como adição mineral inerte na tecnologia de Concreto Compactado com Rolo para sub-base de pavimentos rígidos. Para isto foram analisadas três diferentes formulações, substituindo o agregado miúdo por cinza de madeira em proporções de 0%, 15% e 25%, mantendo a mesma umidade para todas as misturas. Os materiais foram caracterizados por meio de ensaios de granulometria, absorção de água e massa específica. No estado fresco o concreto foi submetido ao ensaio de consistência e após endurecidos à ensaios de resistência à compressão simples, porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente. Observou-se que com o aumento do teor de cinzas a porosidade aberta e absorção de água do concreto tende a aumentar, enquanto a resistência à compressão simples e densidade aparente decrescem. Dado que as formulações com cinzas não atingiram a resistência mínima necessária especificada em norma, trabalhos futuros podem explorar misturas com maior relação água/cimento, e ainda menor percentual de cinzas, para que a concentração ideal possa ser encontrada.

Palavras-chave: pavimento rígido, sustentabilidade, cinza de madeira, concreto compactado com rolo.

ABSTRACT

Considering brazilian scenario, it is possible to notice an increasing demand for transport infrastructure, as well as a strong need for more efficient civil engineering, both economically and environmentally. This work proposes to study the technical applicability of wood ashes in Rolled Compacted Concrete for subbase course in rigid pavements. Thus, three different formulations were analysed, changing wood ashes percentage to replace small aggregate, for this work 0%, 15% and 25% of wood ashes were used. Material characterization, body proof production and tests were performed according to technical norms, where was noticed that as the ashe's percentage increases, porosity and water absorption trends to increase as well, whilst compressive strength trends to decrease. As the formulations with wood ashes have not reached the minimum level of compressive strength specified in technical norms, further works could explore formulations with lower ashe's percentage, aiming to find the ideal mixture for this method to be applied.

Key-words: rigid pavement, sustainability, fly ash, roller-compacted concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição das camadas do pavimento flexível.	14
Figura 2 - Composição das camadas do pavimento rígido.	14
Figura 3 - Comparação no diagrama de tensões em pavimentos rígido e flexível. ...	15
Figura 4 - Pó-de-pedra utilizado na mistura.	24
Figura 5 - Brita 0 utilizada na mistura.	25
Figura 6 - Cimento CP II Z 32 utilizado na mistura.	27
Figura 7 - Cinza de madeira utilizada na mistura.	28
Figura 8 - Conjunto de peneiras utilizadas na determinação da granulometria: agregado graúdo (a); agregado miúdo (b).	30
Figura 9 - Frasco Chapman.	31
Figura 10 - Preenchimento do frasco Chapman (a); Determinação da leitura final (b).	32
Figura 11 - Preenchimento do molde prismático (a); Frasco Chapman em repouso para absorção de água (b).	33
Figura 12 - Imersão em água por 24 h (a); Pesagem do agregado saturado com superfície seca (b); Pesagem do agregado em água (c); Pesagem do agregado seco em estufa (d).	34
Figura 13 – Acessórios utilizados na determinação da consistência.	36
Figura 14 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão.	37
Figura 16 - CP moldados (a); Cura em tanque com água saturada em cal (b).	39
Figura 17 - Corpos de prova de CCR: FB (a); 15% de cinzas (b); 25% de cinzas (c).	40
Figura 18 - Preenchimento do tronco de cone (a); Compactação do material (b).	40
Figura 19 - Abatimento das formulações: base (a); 15% de cinza (b); 25% de cinza.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre pavimentos de concreto convencional e CCR.	17
Tabela 2 - Características físicas do pó-de-pedra.....	25
Tabela 3 - Características físicas da brita 0.	26
Tabela 4 - Características do cimento utilizado na mistura.	27
Tabela 5 - Características físicas do resíduo proveniente da queima da madeira. ...	29
Tabela 6 - Fatores de correção para resistência à compressão de acordo com a relação altura/diâmetro.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de composição granulométrica do pó-de-pedra.	24
Gráfico 2 - Curva de composição granulométrica da brita 0.	26
Gráfico 3 - Curva de composição granulométrica da cinza de madeira.	28
Gráfico 4 - Resistência à compressão simples média das misturas.....	42
Gráfico 5 - Densidade aparente do CCR.....	43
Gráfico 6 – Absorção de água do CCR.	43
Gráfico 7 – Porosidade aberta do CCR.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CCR – Concreto compactado com rolo

°C – Graus Celcius

km – Quilômetros

NBR – Norma Brasileira

mm – Milímetros

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

g/cm³ – Grama por centímetro cúbico

EM – Especificação de material

NM – Norma Mercosul

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

s – Segundos

h – Hora

g – Grama

ton – Toneladas

MPa – MegaPascal

N – Newtons

CP – Corpo de prova

FB – Formulação do CCR Base

F15 – Formulação do CCR com 15% de adição de cinza de madeira

F25 – Formulação do CCR com 25% de adição de cinza de madeira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.2	Metodologia.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Pavimentação	13
2.2	Concreto Compactado com Rolo (CCR)	15
2.3	Adições minerais	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais.....	23
3.1.1	Água.....	23
3.1.2	Pó-de-pedra	Erro! Indicador não definido.
3.1.3	Brita.....	Erro! Indicador não definido.
3.1.4	Cimento.....	26
3.1.5	Cinza de Madeira	27
3.2	Métodos	29
3.2.1	Granulometria	29
3.2.2	Determinação de massa específica e absorção de água do pó-de-pedra ...	31
3.2.3	Determinação de massa específica e absorção de água da brita 0	34
3.2.4	Preparação do concreto e Moldagem dos CP	35
3.2.5	Consistência.....	36
3.2.6	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	36
3.2.7	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Granulometria	Erro! Indicador não definido.
4.2	Determinação de massa específica e Absorção de água do pó-de-pedra Erro! Indicador não definido.	
4.3	Determinação de massa específica e absorção de água da brita 0	Erro! Indicador não definido.
4.4	Moldagem dos CP	39

4.5	Consistência.....	40
4.6	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	41
4.7	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A madeira é uma das matérias primas mais antigas do mundo, consumida em indústrias de papel e celulose, farmacêutica, geração de energia, construção civil, entre outras. Segundo Borlini *et al.* (2005) somente as indústrias do setor de cerâmicas vermelhas são responsáveis pela produção mensal de 310 ton de cinzas de madeira, resíduo este proveniente da queima de eucalipto. O fator agravante é que na composição desse subproduto existem elementos que podem ser nocivos ao meio ambiente e à saúde da população.

No Brasil, a falta de regularização no transporte e coleta de resíduos faz com que o descarte inadequado desse material se torne um problema maior ano após ano (ARAÚJO; PIMENTEL, 2015). A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016) revela que 41,6%, totalizando 29,7 milhões de ton dos resíduos sólidos urbanos coletados em 2016 foram destinados a lixões e aterros desprovidos de sistemas adequados para a proteção do meio ambiente.

Segundo Gluitz e Marafão (2013) a inclusão dos resíduos gerados em outros setores na construção civil pode mostrar-se benéfica devido à redução do emprego de matérias-primas não renováveis que são geralmente utilizadas em construções, de forma a produzir novos materiais econômicos e sustentáveis.

Na construção civil, um dos ramos que vem ganhando destaque é o da pavimentação, visto que segundo Colavite e Konishi (2015) no Brasil o transporte rodoviário é o meio mais utilizado para escoamento de produções e também para a mobilidade da população. A crescente demanda no setor rodoviário vem ocasionando a degradação dos pavimentos (FEDRIGO; ROSA; NÚÑEZ, 2014). De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2017) até o ano de 2016 eram 212.866 km de rodovias pavimentadas e 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas.

Conforme a CNT (2017) para proporcionar uma infraestrutura rodoviária adequada à demanda atual são necessários amplos e contínuos investimentos. A fim de compatibilizar as solicitações impostas com a vida útil têm-se buscado

alternativas de estruturas mais robustas como camadas tratadas com cimento ou de concreto compactado com rolo (CCR), as quais apresentam desempenho superior em relação à capacidade de suporte e propriedades elásticas do pavimento (FEDRIGO; ROSA; NÚÑEZ, 2014).

Conforme Toffolo (2015, p. 3) o CCR é “[...] um concreto desenvolvido como uma alternativa prática, econômica e capaz de solucionar parte dessa demanda da infraestrutura de rodovias”. Sua mistura é caracterizada pela baixa dosagem de cimento e é aplicado em casos de pavimentos que não requerem alta performance de resistência mecânica (RIBEIRO; ALMEIDA, 2000).

Esse trabalho se justifica no intuito de encontrar uma alternativa viável para a pavimentação possibilitando o uso de um dos resíduos sólidos urbanos, minimizando danos ao meio ambiente. A solução proposta é a reutilização das cinzas de madeira na tecnologia de concreto compactado com rolo aplicado a pavimentação.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é analisar a viabilidade de substituições de 0%, 15% e 25% do agregado miúdo por cinza de madeira para aplicação no CCR.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os materiais utilizados na mistura por meio de ensaios físicos;
- Avaliar a resistência à compressão simples do concreto compactado com rolo com substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira;
- Avaliar alterações físicas de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água em relação ao CCR com e sem adição de cinzas.

1.2 Metodologia

Fachin (2006, p. 29) afirma que “[...] método, em pesquisas, seja qual for o tipo, é a escolha de procedimentos sistemáticos para descrição e explicação de um estudo”. O método de pesquisa utilizado nesse trabalho foi o experimental, que conforme Fachin (2006) é caracterizado por ser um método em que as variáveis são manipuladas de forma pré-determinada e controlada pelo pesquisador para observação do estudo.

O experimento será realizado no CCR, onde o agregado miúdo será substituído parcialmente por cinza de madeira. Serão produzidas amostras com teores de 0%, 15% e 25% de cinzas, que serão ensaiadas em laboratório para avaliação de resistência mecânica e algumas características físicas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Colavite e Konishi (2015) afirmam que o setor de transporte tem grande relevância na economia de um país e em seu progresso, viabilizam a mobilidade e a acessibilidade entre pessoas e bens. “Um país torna-se competitivo, na medida em que sua infraestrutura viária possa atender as necessidades e demandas para escoamento de sua produção.” (COLAVITE; KONISHI, 2015, p. 1). Para a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017) a carência na infraestrutura de transporte e logística nacional podem ser solucionadas através da recuperação e da ampliação da malha rodoviária existente.

Segundo Silva (2006) o cenário de degradação precoce dos pavimentos rodoviários acentua a importância da busca por novas tecnologias que resultem em estruturas mais rígidas, a fim de reduzir excesso de trincas e afundamento precoce dos pavimentos.

2.1 Pavimentação

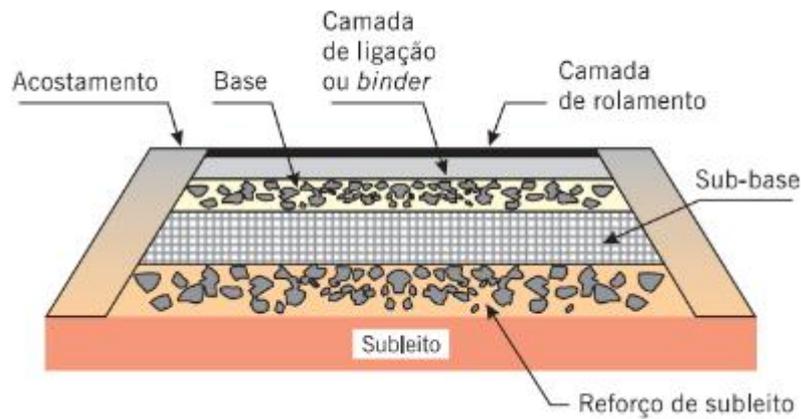
Pavimento é definido como

[...] estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. (BERNUCCI *et al.*, 2006, p. 9)

Bernucci *et al.* (2006) classifica os pavimentos em dois tipos, que são:

- Flexíveis: também conhecidos como pavimentos asfálticos, são compostos por camada de revestimento (agregados e ligantes asfálticos), base, sub-base e reforço do subleito (camada final de terraplenagem), como observa-se na Figura 1. Dependendo do caso, o projeto poderá apresentar ausência de algumas camadas.

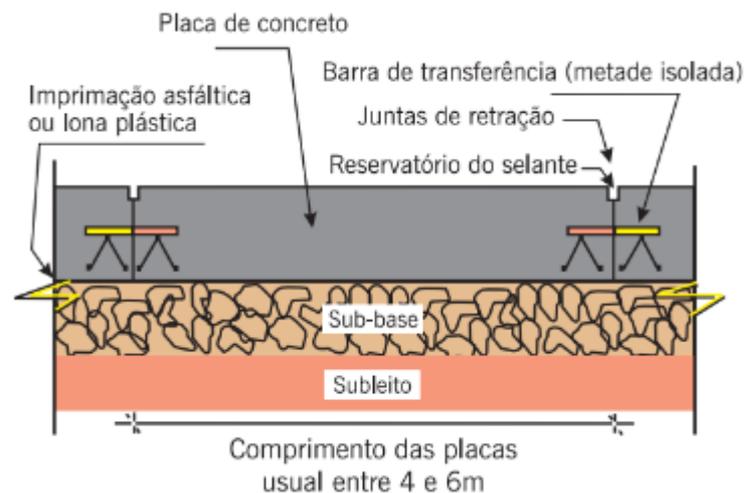
Figura 1 - Composição das camadas do pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

- Rígidos: também conhecidos como pavimento de concreto de cimento Portland ou pavimentos de concreto-cimento, possuem como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland, armadas ou não com barras de aço. A espessura das camadas é definida a partir da resistência à flexão que cada camada apresenta. A estrutura desse tipo de pavimento é exposta na Figura 2.

Figura 2 - Composição das camadas do pavimento rígido.

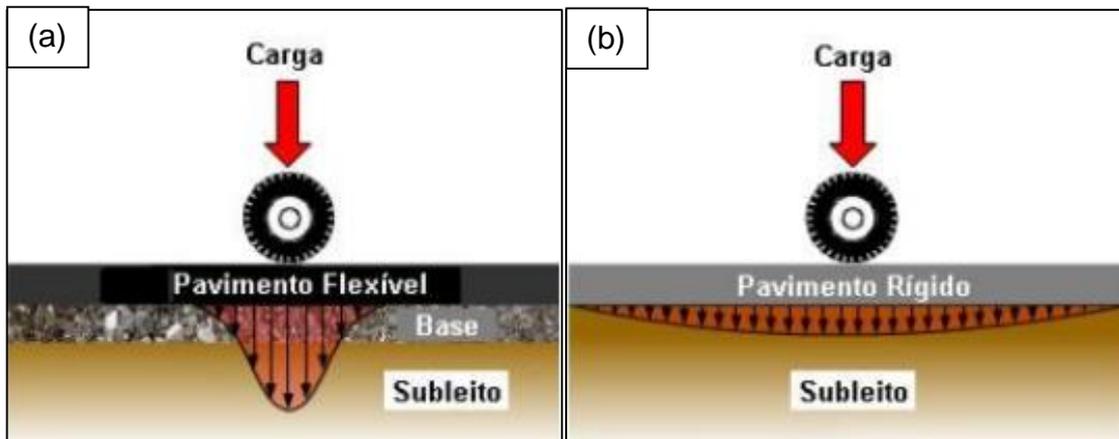


Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

De acordo com o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT, 2006) o pavimento é dividido em três classificações distintas:

- Flexível: aqueles que, ao serem submetidos a carregamentos, apresentam deformação elástica em todas as camadas que o formam, visto que as cargas dividem-se de forma equivalente entre elas (Figura 3a).
- Semi-rígido: aqueles formados por uma base rígida (com propriedades cimentícias) e revestimento asfáltico (flexível).
- Rígido: aquele que apresenta revestimento rígido, o qual absorve a maior parte do carregamento (Figura 3b).

Figura 3 - Comparação no diagrama de tensões em pavimentos rígido e flexível.



Fonte: adaptado de Araújo *et al.*, 2016.

Entre os tipos de pavimentos rígidos tem-se o Concreto Compactado com Rolo (CCR), conhecido também como concreto seco ou concreto rolado. Silva (2006) afirma que o CCR é uma tecnologia que merece ser pesquisada, visto que combina: custo atrativo, facilidade de execução, maior durabilidade e resistência, baixa deformação, e ainda, por ser um pavimento rígido absorve e distribui melhor os carregamentos exercidos pelo tráfego.

2.2 Concreto Compactado com Rolo (CCR)

Andriolo (1989) define o CCR como um concreto de consistência seca, que em seu estado fresco possui trabalhabilidade tal que permita sua mistura, transporte,

lançamento e compactação com equipamentos comuns de terraplenagem ou enrocamento.

Segundo a norma do DNIT/056 (2013, p. 2) o CCR “[...] para sub-base de pavimento rígido é um concreto simples com baixo consumo de cimento e consistência seca, permitindo a compactação com rolos compressores ou equipamento similar”.

O American Concrete Institute (ACI, 2000, p. 18) descreve como “[...] concreto que, em seu estado não endurecido, irá suportar um rolo enquanto é compactado”. Para a Portland Cement Association (PCA, 1987, p. 7) “CCR é um concreto com abatimento nulo que é misturado, espalhado e compactado com equipamentos comumente empregados na pavimentação asfáltica”.

Para Jofré *et al.* (1990) apud Trichês (1993, p. 12) “CCR é uma mistura de agregado, água e cimento, que atinge resistência similar ao concreto convencional para pavimento [...]”.

Silva (2006) aponta que o CCR deve ser seco de maneira que suporte o peso do equipamento de compactação, bem como úmido o suficiente para garantir o correto adensamento das partículas, de forma que o resultado final seja um concreto com características similares ao concreto convencional. Vale acrescentar que a consistência seca da mistura deve garantir que as partículas da mesma não grudem no rolo compactador durante o processo.

Harrington *et al.* (2010) aponta a importância da boa compactação antes do endurecimento da pasta entre agregados, afirmando que esse processo reduzirá o teor de vazios do pavimento, tornando a estrutura adequadamente densa para suportar o recebimento de cargas.

Conforme Ribeiro e Almeida (2000) estudos recentes comprovam que, desde que seja aplicada uma formulação correta e que materiais de qualidade sejam utilizados, o CCR pode apresentar comportamento similar, ou melhor, em relação ao concreto convencional, devido à alta energia aplicada durante a compactação. A Tabela 1 traz algumas das principais diferenças entre o CCR e o concreto convencional no âmbito da pavimentação.

Tabela 1 - Diferenças entre pavimentos de concreto convencional e CCR.

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

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

O DNIT (2004) aponta outras duas diferenças relevantes em relação aos dois tipos de concreto:

- O concreto convencional consome cerca de 320 kg/m³, enquanto o CCR consome entre 85 e 220 kg/m³;
- Para o CCR não existem exigências rigorosas quanto à qualidade do agregado graúdo, nem quanto a granulometria do mesmo. Apesar de

essa característica fazer com que o CCR seja empregado em casos menos críticos, traz a possibilidade de que sejam utilizados materiais que seriam descartados em se tratando de pavimentos de concreto convencional.

A United States Army Corps of Engineers (USACE, 2000) coloca que uma das principais vantagens do uso do CCR no lugar do concreto convencional está na redução de custo de 20% a 50%, tal variação dependerá do custo do agregado e do cimento escolhidos, da complexidade de colocação e do volume de concreto utilizado.

As misturas de CCR, se comparadas ao concreto convencional, possuem teores inferiores de cimento, água e agregados graúdos, em contrapartida apresentam maior volume de agregados miúdos, os quais preenchem de forma eficiente os vazios do pavimento. O alto intertravamento entre as partículas garante ao CCR a capacidade de absorção da carga inicial do pavimento, sendo indicado a pavimentos por onde trafegam cargas pesadas em baixa velocidade (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Segundo Ribeiro e Almeida (2000) além do uso em pavimentação, o CCR é bastante aplicado na construção de barragens. A USACE (2000) propõe que o uso do CCR seja considerado em circunstâncias como: em locais que possa ser transportado, distribuído e compactado com o uso de equipamentos rolantes; em projetos onde se apresente mais atrativo economicamente em relação a outros métodos; em obras de proteção a taludes, entre outros.

De acordo com Harrington *et al.* (2010) a aplicabilidade do CCR tem se dado também em obras como:

- Estacionamentos e ruas de acesso a plantas industriais;
- Estaleiros, portos e docas de carregamento intermodais;
- Estradas rurais e urbanas com baixo volume de tráfego;
- Estacionamento de aeronaves;
- Grandes estacionamentos comerciais;
- Acostamentos;
- Entre outros.

Sobre as vantagens desse tipo de pavimento destaca-se a redução no tempo de construção, pois a colocação quase contínua de material aumenta a

produtividade do processo, diminuindo o tempo de aplicação em meses ou anos o que impactará positivamente no custo final da obra (USACE, 2000).

Harrington *et al.* (2010) acrescenta, ainda, outros benefícios como:

- Não necessita de fôrmas, tirantes e reforço em aço;
- A menor quantidade de pasta resulta em menor retração do concreto, e consequentemente apresenta menos fissuras relacionadas à retração;
- Pode ser projetado para possuir alta resistência à flexão, à compressão e ao cisalhamento, de forma a suportar cargas repetitivas, pesadas e concentradas sem falhar;
- Por possuir baixa permeabilidade, apresenta ótima durabilidade e resistência aos ataques químicos, mesmo em condições de gelo e degelo;
- Tempo e custo relacionados a manutenção de juntas podem ser eliminados, pois juntas serradas normalmente não são necessárias;
- A cor clara dos pavimentos de CCR requer menos equipamentos de iluminação;

Harrington *et al.* (2010) aponta também algumas limitações que o CCR apresenta:

- Se não realizada a texturização com disco diamantado o tráfego para altas velocidades torna-se indesejável devido a textura suave desse tipo de pavimento;
- O volume de CCR que pode ser misturado em um caminhão em um determinado momento será menor que o concreto convencional permitiria, devido a consistência seca da mistura;
- Ao finalizar uma pista, a pista adjacente deve ser feita até uma hora após o início da primeira, para garantir ligação adequada entre elas (caso não aconteça deve ser feita uma junta fria);
- As bordas do pavimento são mais difíceis de compactar, por isso o grau de compactação exigido nesse pedaço é 2% menor que no meio, tornando-se uma área mais sensível, ainda que apresente bom desempenho;
- Devido ao baixo teor de água nesse tipo de pavimento, em climas quentes é necessário maior atenção para minimizar a perda de umidade por evaporação;

- Pela consistência seca, os requisitos de dosagem da mistura podem ser mais críticos que no concreto convencional.

Mesmo apresentando alguns desafios, o CCR mostra-se como uma solução altamente qualificada a atender as demandas de recuperação e expansão da malha rodoviária do país, de forma mais econômica e produtiva. A presente pesquisa estudará o CCR focando sua aplicação em sub-base de pavimentos. A fim de tornar o método de implantação do CCR mais sustentável propõe-se adicionar cinza de madeira a mistura, destinando de forma mais adequada o resíduo em estudo.

2.3 Adições minerais

A ABNT/NBR 11172 (1990, p. 4) define adições como “Produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”.

As adições minerais são classificadas em: material pozolânico, material cimentante e material inerte. A ABNT/NBR 12653 (2015) define material pozolânico como materiais silicosos ou silico-aluminosos que, por si, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas durante a hidratação reage com o hidróxido de cálcio que é liberado pelo cimento, formando compostos com propriedades ligantes.

Mehta e Monteiro (1994) apud Fonseca (2010) conceituam adições cimentantes como materiais que possuem propriedades aglutinantes, sem a necessidade do hidróxido de cálcio, porém as ligações formadas e sua taxa de formação são insuficientes para aplicações estruturais.

As adições inertes, como o fíler, não possuem atividades químicas, sua função é o preenchimento e empacotamento granulométrico, aumentando a compacidade da mistura e refinando os poros (DAL MOLIN, 2005 apud BENNACK, 2016).

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

De acordo com Albuquerque e Lima (2014) cada tipo de adição mineral atuará distintamente de acordo com sua granulometria, atividade química (ou física) e composição mineralógica. Nesse trabalho optou-se pela adição de cinza de madeira, que para Siddique (2012, p. 28) é “[...] o resíduo gerado pela combustão de madeira e dos produtos de madeira (lasca, serragem, cascas, etc.)”.

Fonseca (2010, p. 38) conceitua cinzas volantes como sendo “[...] pequenas partículas coletadas por sistemas anti-pó das usinas termelétricas que queimam carvão em altas temperaturas.”

Conforme Cheah e Ramli (2011) existem diversos fatores que influenciam aspectos quantitativos e qualitativos da cinza de madeira, entre estes estão a temperatura de tratamento térmico da madeira, o tipo e a hidrodinâmica do forno e as espécies de árvores das quais os resíduos de madeira foram provenientes.

Devido às suas características mineralógicas e granulométricas peculiares, a cinza volante geralmente não necessita passar por nenhum processo de beneficiamento antes de ser utilizada como adição mineral (FONSECA, 2010).

As cinzas volantes quando adicionadas ao concreto funcionam corrigindo a granulometria do agregado miúdo ou como substituto parcial do cimento, bem como, podem exercer ambas as funções de forma simultânea (RESENDE, 2013)

Estudos prévios em concreto com adição de cinza de madeira indicam mudanças em parâmetros como trabalhabilidade, absorção de água, porosidade e resistência à compressão.

Segundo Resende (2013) o emprego de cinza volante como adição mineral ao concreto tem grande influência em parâmetros como consumo de água, trabalhabilidade do concreto no estado e velocidade de desenvolvimento da resistência no concreto endurecido.

Udoeyo *et al.* (2006) ao adicionar cinza como reforço ao cimento, evidenciou a diminuição da trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco, para a mesma relação água-cimento, na medida em que a proporção de cinzas na mistura crescia. Pelo estudo observou-se que com o aumento do teor de cinzas, houve redução na resistência à compressão do concreto.

Em seu estudo, Aghabaglou *et al.* (2013) utilizou cinza de madeira em dois cenários, no primeiro como substituição parcial do cimento e no segundo como substituição parcial dos agregados. Os autores concluíram que os parâmetros de porosidade e absorção de água cresceram nas misturas de CCR que utilizavam a

cinza para substituir o cimento. Já as misturas que substituíram parte do agregado por cinzas sofreram uma diminuição na porosidade e absorção de água do concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais utilizados na preparação do CCR e os ensaios realizados para sua avaliação.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na produção de CCR foram água, cimento, pó-de-pedra, brita e cinza de madeira.

3.1.1 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Joinville/SC.

3.1.2 Agregado miúdo

A norma DNIT 056 (2013) sugere que para esse tipo de concreto seja utilizada areia artificial (pó-de-pedra). O material foi adquirido em uma empresa da região de Joinville/SC.

Segundo a ABNT/NBR 16312-2 a areia utilizada deve assegurar um mínimo de fino a fim de produzir um concreto trabalhável, com boa compactidade e que permita um acabamento adequado, logo, a norma coloca que a granulometria pode não condizer com a ABNT/NBR 7211. A caracterização do material foi através de ensaios de granulometria, massa específica e absorção de água. A Figura 4 apresenta uma pequena amostra do pó-de-pedra.

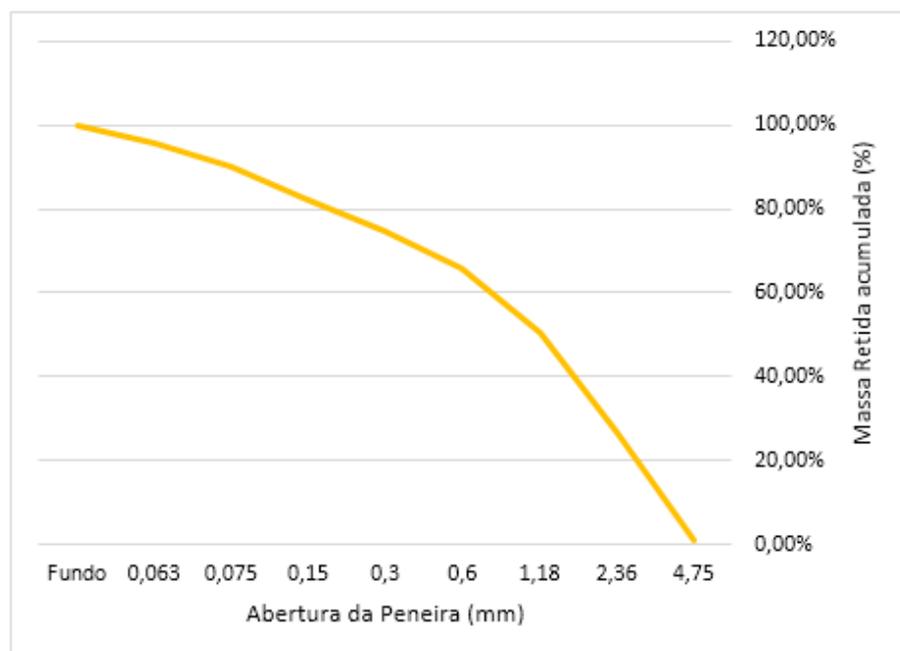
Figura 4 - Pó-de-pedra utilizado na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

O Gráfico 1 foi obtido com as informações provenientes do ensaio de granulometria, o mesmo apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo. Observa-se que não se trata de um material bem graduado, pois possui quantia razoável de finos em sua composição. Tal característica interfere diretamente na trabalhabilidade da mistura, produzindo um concreto mais seco, e também nas propriedades físicas (porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água) do concreto endurecido.

Gráfico 1 - Curva de composição granulométrica do pó-de-pedra.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 2 apresenta algumas características físicas do pó-de-pedra, oriundas dos ensaios de granulometria, determinação de massa específica e absorção de água.

Tabela 2 - Características físicas do pó-de-pedra.

Material	Massa específica	Absorção de água	Diâmetro máximo	Módulo de Finura
Pó-de-pedra	2,76 g/cm ³	12,5%	4,75 mm	1,03

Fonte: Autor, 2018.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo que foi utilizado na mistura é proveniente da região de Joinville/SC. A norma DNIT 056 (2013) fixa que no CCR o diâmetro máximo dos agregados deve ser 1/3 da espessura da camada de concreto ou 32 mm, o que apresentar menor valor.

Para a produção do CCR foi utilizada brita 0. A Figura 5 apresenta uma pequena amostra da brita.

Figura 5 - Brita 0 utilizada na mistura.

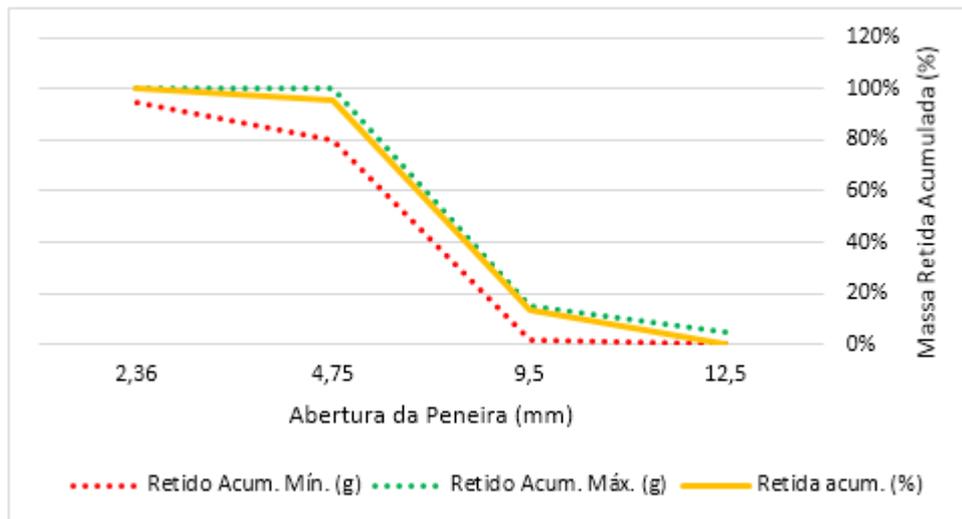


Fonte: Autor, 2018.

O Gráfico 2 mostra a porcentagem de massa retida acumulada da brita 0 utilizada na mistura, bem como a zona granulométrica recomendada pela norma para agregados com tamanho mínimo 4,75 mm e máximo 12,5 mm. As frações

granulométricas estão de acordo com a ABNT/NBR 7211 (2009). Trata-se de um agregado bem graduado, o que auxilia no empacotamento das partículas no processo de compactação, proporcionando melhor comportamento na resistência à compressão, visto que a absorção da carga se dá por meio da transferência de carga entre os grãos.

Gráfico 2 - Curva de composição granulométrica da brita 0.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 3 apresenta algumas características físicas da brita 0, oriundas dos ensaios de granulometria, determinação de massa específica e absorção de água.

Tabela 3 - Características físicas da brita 0.

Material	Massa específica do agregado seco	Massa específica do agregado saturado com superfície seca	Absorção de água	Diâmetro máximo	Módulo de Finura
Brita 0	2,76 g/cm ³	2,78 g/cm ³	1,83%	12,5 mm	2,10

Fonte: Autor, 2018.

3.1.4 Cimento

Na mistura foi utilizado o cimento CII-Z-32, de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2015) é um cimento Portland composto por

pozolana. A Tabela 4 apresenta as características técnicas do produto e a Figura 6 apresenta uma pequena amostra do mesmo.

Tabela 4 - Características do cimento utilizado na mistura.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória Granulada de alto forno (Sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Composto	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	NBR 111578

Fonte: adaptada de ABCP, 2002.

Figura 6 - Cimento CP II Z 32 utilizado na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

3.1.5 Cinza de Madeira

Os resíduos foram fornecidos por uma indústria de painéis e produtos de madeira, localizada em Araucária (Paraná). Estas cinzas são provenientes da combustão incompleta de Pinus (casca, galhos, folhas e subprodutos madeireiros resultantes do processo de beneficiamento da madeira).

Será utilizada a caracterização da cinza de madeira realizada por Bennack (2016), visto que o resíduo é proveniente da mesma empresa. A Figura 7 apresenta uma pequena amostra do resíduo.

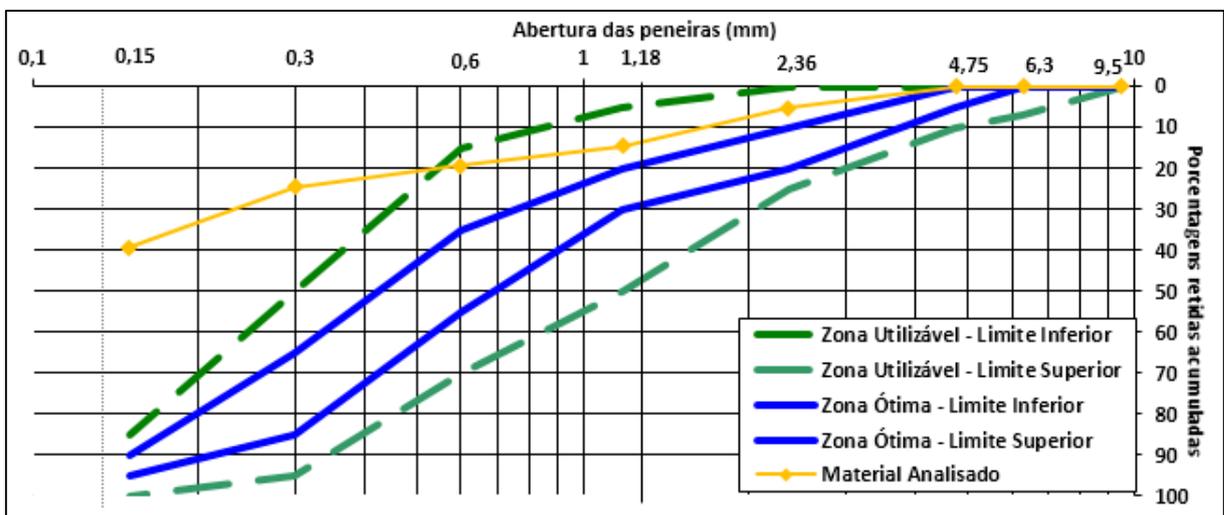
Figura 7 - Cinza de madeira utilizada na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

A curva granulométrica da cinza de madeira está representada no Gráfico 3, a mesma foi obtida previamente por Bennack (2016) através de ensaio de granulometria.

Gráfico 3 - Curva de composição granulométrica da cinza de madeira.



Fonte: adaptado de Bennack, 2016.

Para a caracterização a autora determinou alguns aspectos físicos do resíduo através dos ensaios de absorção de água e massa específica. Ainda, por meio do ensaio de granulometria foi determinado o diâmetro máximo e o módulo de finura do material. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características físicas do resíduo proveniente da queima da madeira.

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

Fonte: Bennack, 2016.

3.2 Métodos

Esta seção apresenta os procedimentos para a realização dos ensaios no CCR.

3.2.1 Distribuição granulométrica

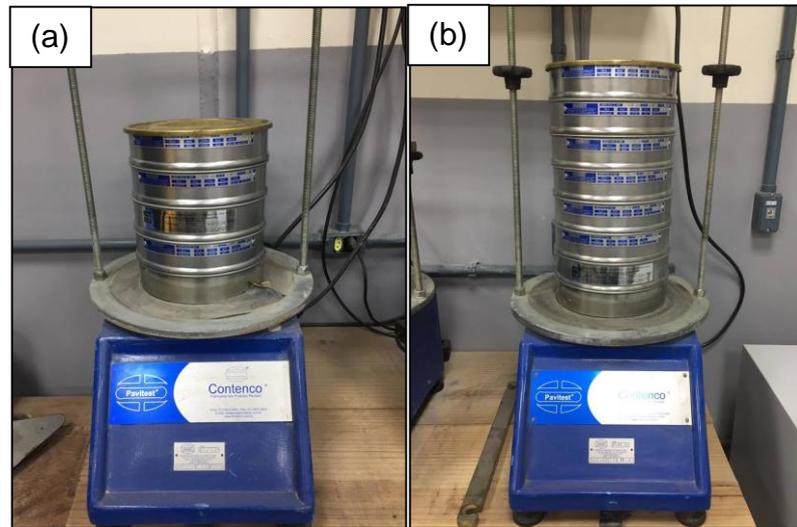
O ensaio de granulometria dos agregados foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC, conforme diretrizes da ABNT/NBR NM 248 (2003) e respeitando os limites da ABNT/NBR 7211 (2009) e ABNT/NBR 16312-2.

Para a elaboração do ensaio, os agregados foram secos previamente em estufa à 105°. As amostras foram separadas em 1000 g de brita e 1000 g de pó-de-pedra, sendo que para coletar a amostra da areia foi feito o quarteamento. As amostras foram divididas em duas com 500 g cada e o ensaio foi realizado para cada uma delas. O resultado final foi dado através da média entre os ensaios.

As peneiras foram limpas e encaixadas por ordem de abertura de malha da base para o topo. Para o agregado graúdo utilizaram-se as peneiras 12,7mm-9,5mm-4,75mm-2,36mm, formando um único conjunto provido de fundo e tampa. A peneira de abertura 6,3 mm não foi incluída, como sugere a norma, devido a indisponibilidade da mesma no laboratório.

Para o pó-de-pedra utilizaram-se as peneiras 4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm-0,075mm-0,63mm, juntamente com tampa e fundo. A Figura 8 mostra os conjuntos de peneiras utilizados nos ensaios.

Figura 8 - Conjunto de peneiras utilizadas na determinação da granulometria: agregado graúdo (a); agregado miúdo (b).



Fonte: Autor, 2018.

O conjunto de peneiras foi posicionado no eixo central do agitador eletromagnético e a porção de material colocada sobre a peneira superior (de maior abertura). As peneiras foram agitadas mecanicamente por 10 min. Em seguida, destacou-se a peneira superior e foi encaixado um fundo na mesma para que a agitação manual fosse feita por 1 min. O material passante foi adicionado a peneira seguinte da pilha, esse procedimento foi repetido para todas as demais peneiras. As porções retidas em cada peneira foram pesadas e a partir dos dados as curvas granulométricas foram elaboradas.

O módulo de finura e o diâmetro máximo característico dos agregados foram determinados segundo a ABNT/NBR 7211. O módulo de finura dos materiais foi calculado dividindo-se a soma das porcentagens retidas acumuladas de cada peneira de série normal por cem. Já o diâmetro máximo do agregado foi determinado de acordo com o número da peneira de série normal na qual a porcentagem retida acumulada foi inferior ou igual a 5% e superior a 5% na peneira imediatamente abaixo.

3.2.2 Determinação de massa específica e absorção de água do pó-de-pedra

Para o pó-de-pedra a massa específica foi determinada seguindo as premissas do DNER-ME 194 (1998), utilizando o frasco de Chapman, como mostra a Figura 9.

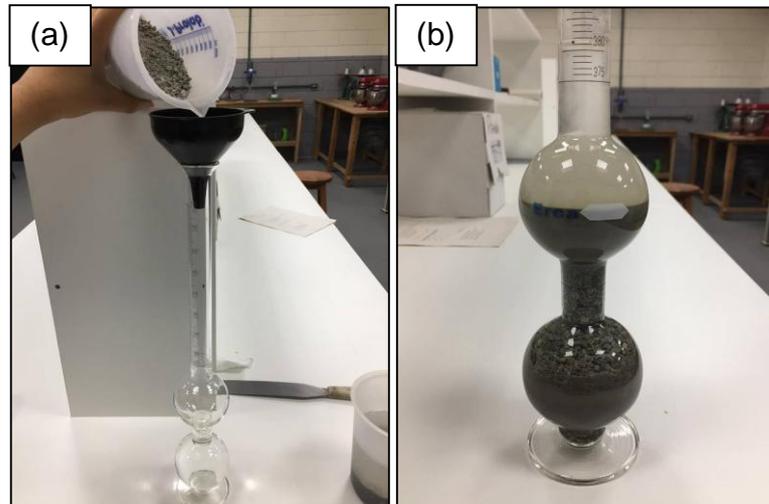
Figura 9 - Frasco Chapman.



Fonte: Autor, 2018.

O frasco foi preenchido com água até a marca 200 cm³, localizada entre os dois bulbos, e mantido em repouso para que toda água de sua parede escorresse. Após, foi adicionado cuidadosamente, com funil, 500 g de pó-de-pedra previamente seco em estufa. Agitou-se o frasco para que as bolhas de ar fossem eliminadas. Com as paredes do frasco secas e sem grãos aderentes, aferiu-se na escala o volume atingido do conjunto água e agregado. O ensaio foi feito para duas amostras de 500 g do mesmo agregado e o valor final foi determinado através da média entre os dois resultados, a Figura 10 apresenta algumas etapas do processo.

Figura 10 - Preenchimento do frasco Chapman (a); Determinação da leitura final (b).



Fonte: Autor, 2018.

A Equação (1) foi utilizada para a determinação da massa específica do agregado miúdo.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (1)$$

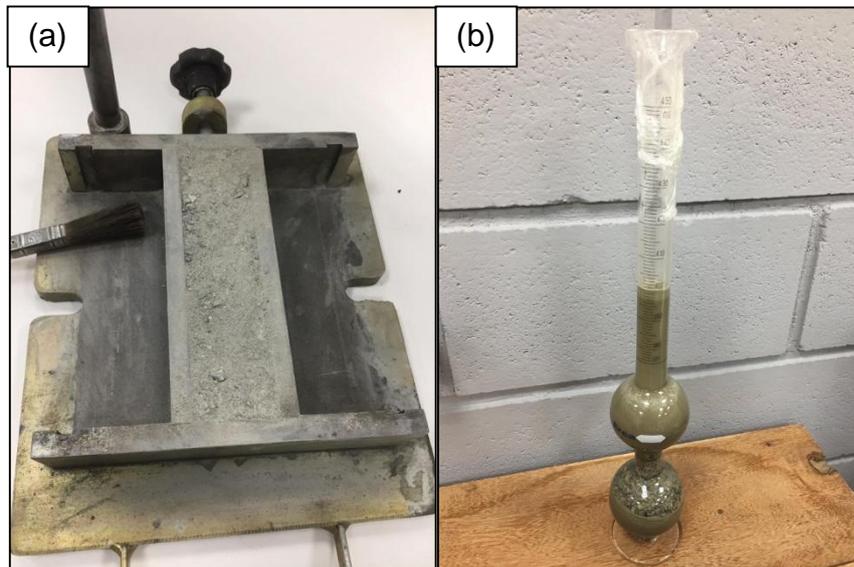
Onde:

γ é a massa específica do agregado.

L é a leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água/pó-de-pedra).

Para a determinação da absorção de água do agregado miúdo foi reproduzido o método realizado por Bennack (2016). Foi utilizado um molde metálico prismático para argamassas, com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, para a determinação do volume de pó-de-pedra. O molde foi preenchido com o material, com o auxílio de um soquete pequeno. O frasco Chapman foi preenchido com água até a marca de 200 cm³ e após, o pó-de-pedra foi adicionado com o auxílio de um funil. A leitura do frasco foi realizada após 5 dias, para garantir total absorção das partículas. A Figura 11 apresenta algumas etapas do processo.

Figura 11 - Preenchimento do molde prismático (a); Frasco Chapman em repouso para absorção de água (b).



Fonte: Autor, 2018.

Foram utilizadas as Equações 2 e 3 para a obtenção do resultado final da absorção de água.

$$\text{Água absorvida} = (V_{\text{água+agregado}} - V_{\text{final}}) \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

$V_{\text{água + agregado}}$ é a soma entre o volume inicial de água (200 cm³) e o volume do molde, em cm³.

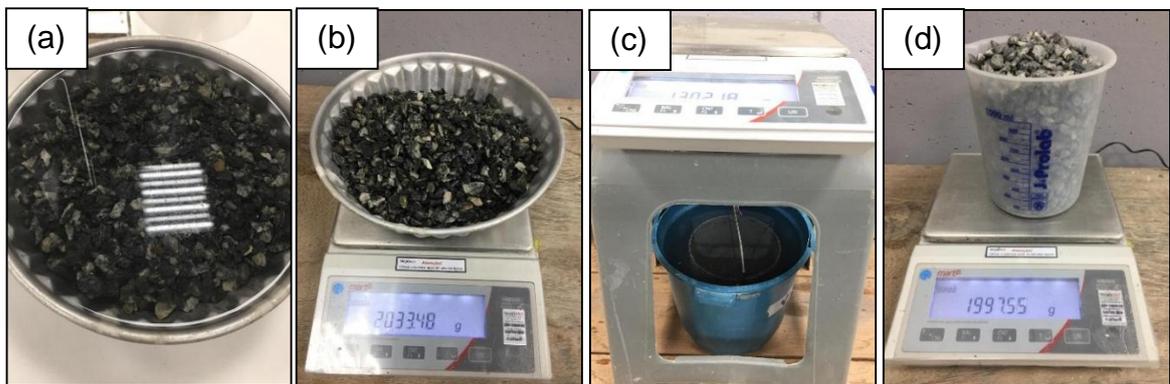
V_{final} é o volume aferido no frasco de Chapman ao término do ensaio, em cm³.

$$\text{Absorção} = \frac{\text{Água absorvida} * 100}{V_{\text{água+agregado}}} \text{ [%]} \quad (3)$$

3.2.3 Determinação de massa específica e absorção de água da brita 0

Foi realizado ensaio para determinação da massa específica e absorção de água do agregado graúdo conforme diretrizes da ABNT/NBR NM 53 (2009). Uma amostra de 2 kg do material foi separada e submersa em água por 24 h. Após esse período, a amostra foi seca superficialmente com pano limpo e imediatamente pesada, registrando a massa do agregado saturado com superfície seca (m_s) em gramas. O material foi depositado em um cesto vazado e imerso em água, registrando-se a massa do agregado em água (m_a), em gramas. A mesma amostra foi seca em estufa com temperatura de 105° e então pesada novamente, obtendo-se a massa do agregado seco (m) em gramas. A Figura 12 apresenta as etapas de obtenção das massas.

Figura 12 - Imersão em água por 24 h (a); Pesagem do agregado saturado com superfície seca (b); Pesagem do agregado em água (c); Pesagem do agregado seco em estufa (d).



Fonte: Autor, 2018.

A massa específica do agregado na condição saturado superfície seca foi obtida com a Equação (4).

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (4)$$

A massa específica do agregado seco foi obtida com a Equação (5).

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (5)$$

A absorção de água foi calculada com a Equação (6).

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 \text{ [%]} \quad (6)$$

3.2.4 Preparação do concreto e Moldagem dos CP

A dosagem do concreto foi elaborada em estudo anterior realizado. O traço utilizado, em massa, foi 1:7:7 (cimento, brita, areia) com 6,5% de umidade sobre a massa seca, com consumo de cimento de 120 kg/m³. O concreto e os corpos de prova (CP) foram produzidos no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina, no Campus de Joinville.

O concreto foi produzido em betoneira e seguiu os seguintes passos:

- Pesagem dos materiais;
- O agregado graúdo foi adicionado na betoneira com metade da água necessária para a mistura, misturando-se por 1 min;
- O cimento, a areia e o restante da água foram adicionados, nessa ordem. Misturou-se por mais 3 min finalizando a preparação do concreto;
- Nas formulações em que foram adicionadas as cinzas, as mesmas serão colocadas logo após a areia e antes do restante da água.

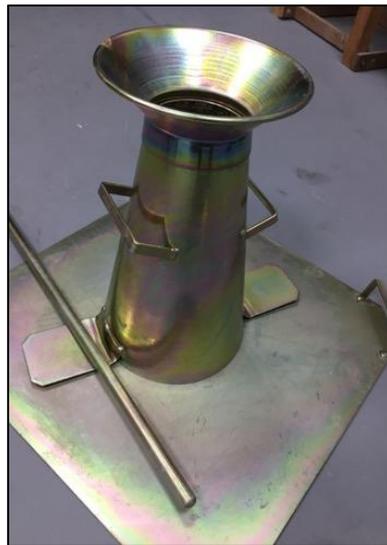
A moldagem dos CP foi realizada de acordo com os procedimentos do DNIT/056 (2013), porém foram utilizados moldes cilíndricos 10x20 ao invés dos recomendados com 15x30. Os CP serão executados em cinco camadas e cada camada receberá 30 golpes com o soquete de Proctor modificado (4,5 kg), com altura de queda de 45 cm.

Para cada uma das três formulações foram produzidos quatro CP. Assim que concluída a moldagem, como estabelece a norma, foram cobertos com lona úmida para evitar a evaporação de água durante o endurecimento do CCR. Após o intervalo mínimo de 24 h, foram desmoldados e depositados em tanque com água não corrente saturada em cal e mantidos até o momento do ensaio de compressão.

3.2.5 Consistência

O *slump test* foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC, para cada uma das misturas produzidas, seguindo as especificações dispostas na ABNT/NBR NM 67 (1998). No primeiro momento os equipamentos para o teste (cone, placa e bastão soquete) foram limpos e umedecidos. Após o término da mistura, o cone foi preenchido em três camadas, com 25 golpes cada uma. Retirou-se o cone com cuidado e mediu-se a altura final da mistura. Todo o ensaio foi realizado dentro do intervalo de tempo limite de 150 segundos. Na Figura 13 estão os utensílios utilizados no ensaio.

Figura 13 – Acessórios utilizados na determinação da consistência.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado na Perville Engenharia e Empreendimentos, situada em Joinville/SC. A norma que padroniza esse ensaio é a ABNT/NBR 5739 (2007), os CP foram rompidos com idade de 28 dias na prensa hidráulica apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor, 2018.

A resistência à compressão simples foi determinada através da Equação 7. Tendo em vista que antes do ensaio os CP têm suas superfícies superior e inferior retificadas, o valor resultante de resistência para cada CP é multiplicado por um fator de correção determinado pela norma, conforme relação altura/diâmetro (h/d) do mesmo. A Tabela 6 traz os fatores corretivos, nota-se que para valores intermediários entre as relações é realizada interpolação.

Tabela 6 - Fatores de correção para resistência à compressão de acordo com a relação altura/diâmetro.

Relação h/d	2,00 até 1,94	1,75	1,5	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Fonte: ABNT, 2007.

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

Onde:

F_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a força máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo-de-prova, em mm.

3.2.7 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Para a determinação das propriedades físicas do concreto considerou-se o princípio de Arquimedes. Para isso, foram coletados pedaços de todos os CP provenientes do rompimento, aos 28 dias de cura, mantidos em estufa à 103° por 24 h e em seguida pesados para registro da massa seca em estufa (M_s). Em um segundo momento, os pedaços foram imersos em água por 72 h e foi registrada a massa imersa em água (M_i). Os pedaços foram secos superficialmente e pesados novamente, registrando a massa saturada com superfície seca (M_{SSS}).

Com base nas medições, determinaram-se as propriedades físicas através das Equações abaixo:

$$\textit{Absorção de água} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100 \quad [\%] \quad (8)$$

$$\textit{Densidade aparente} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_i} \quad [g/cm^3] \quad (9)$$

$$\textit{Porosidade aberta} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_i} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

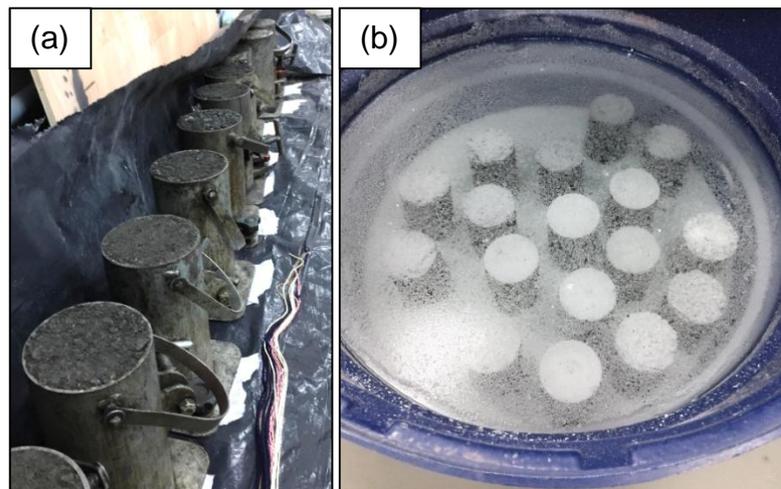
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados durante a pesquisa, bem como a discussão dos mesmos.

4.1 Moldagem dos CP

O intuito inicial da pesquisa seria testar com formulações acima de 25% de cinzas. Porém, durante o preparo da formulação com 25% de cinzas observou-se que a consistência era muito seca em relação à FB, dificultando a compactação. Concluiu-se que para essa umidade seria inviável elaborar formulações com teores de cinza acima de 25%. Na Figura 16 estão os CP moldados e o tanque com água saturada em cal onde foram mantidos até o momento do ensaio de resistência à compressão simples.

Figura 15 - CP moldados (a); Cura em tanque com água saturada em cal (b).

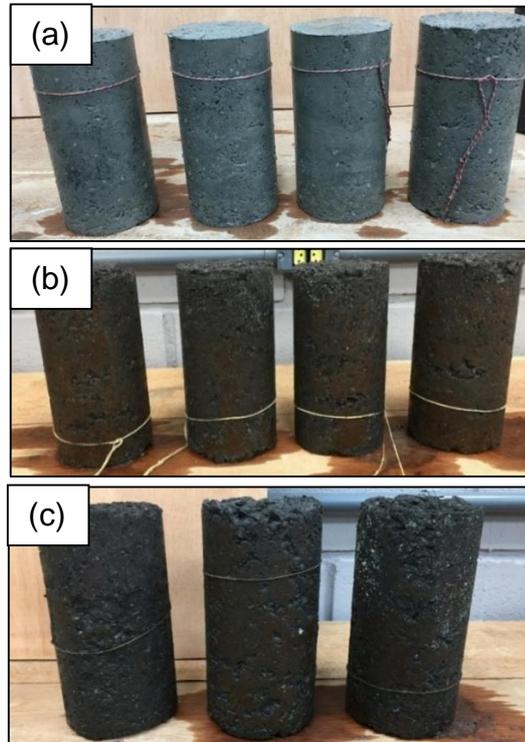


Fonte: Autor, 2018.

A Figura 17 mostra os CP após serem desmoldados, foram produzidos quatro CP por formulação. Um CP da mistura com 25% de cinzas quebrou durante o

desmolde, devido à alta aderência do concreto ao molde e a tendência de esfarelar do mesmo.

Figura 16 - Corpos de prova de CCR: FB (a); 15% de cinzas (b); 25% de cinzas (c).

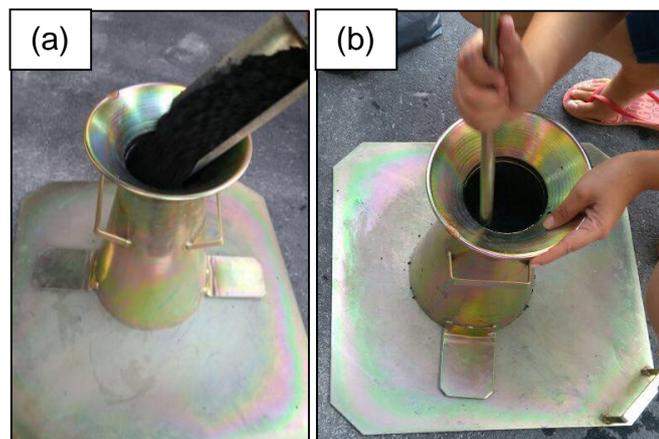


Fonte: Autor, 2018.

4.2 Consistência

O processo de preenchimento do cone para o *slump test* da formulação com 15% de cinzas foi registrado, como mostra a Figura 18.

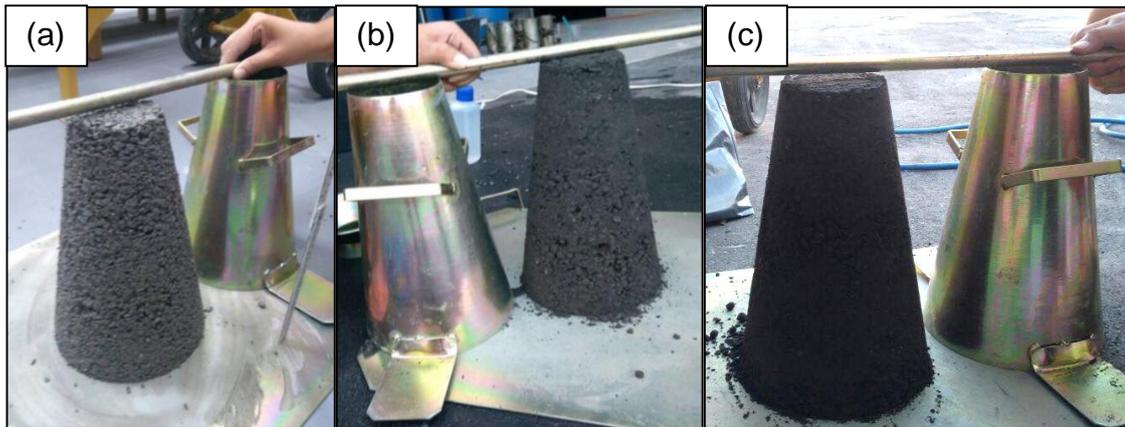
Figura 17 - Preenchimento do tronco de cone (a); Compactação do material (b).



Fonte: Autor, 2018.

Como previsto na literatura por PCA (1987), para todas as formulações o abatimento do CCR foi zero, como pode ser observado na Figura 19. Essa característica é imprescindível nesse tipo de concreto para garantir o limiar entre a umidade ideal para boa compactação e a consistência seca que suporte o peso do rolo vibratório, de forma a garantir a não aderência dos grãos no equipamento.

Figura 18 - Abatimento das formulações: base (a); 15% de cinza (b); 25% de cinza.

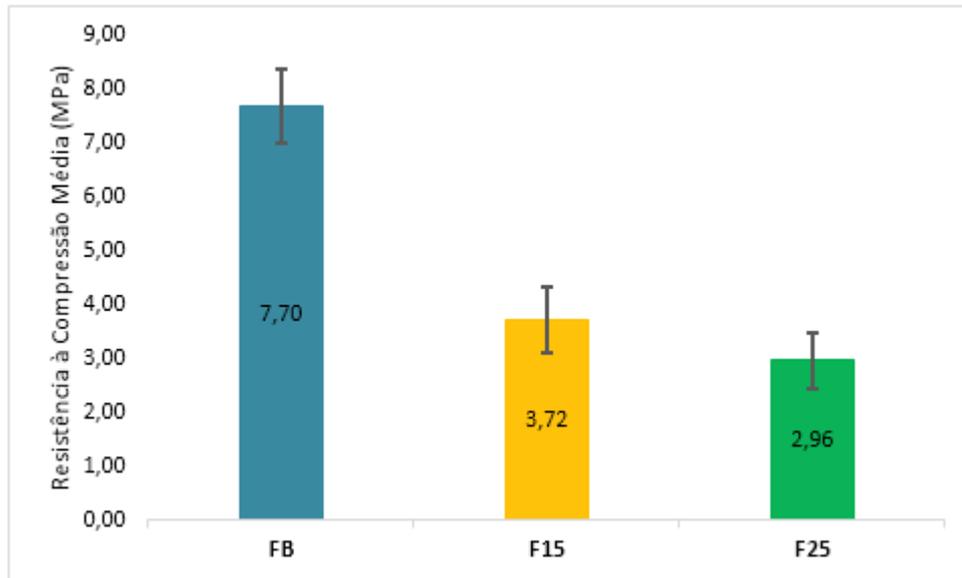


Fonte: Autor, 2018.

4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O DNIT/056 (2013) define que a resistência mínima à compressão aos 7 dias para a aplicação de CCR em sub-base é 5 Mpa. A partir da ABNT/NBR (2014) foi possível estimar que aos 7 dias o concreto deve atingir 78% da resistência obtida aos 28 dias. Logo, estima-se que os CP devem alcançar a resistência de 6,41 MPa. Os CP que continham cinzas não puderam ser retificados, visto que ao tentar retificar as partículas se soltavam do CP causando ainda mais irregularidades. Os resultados do ensaio de compressão estão apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência à compressão simples média das misturas.



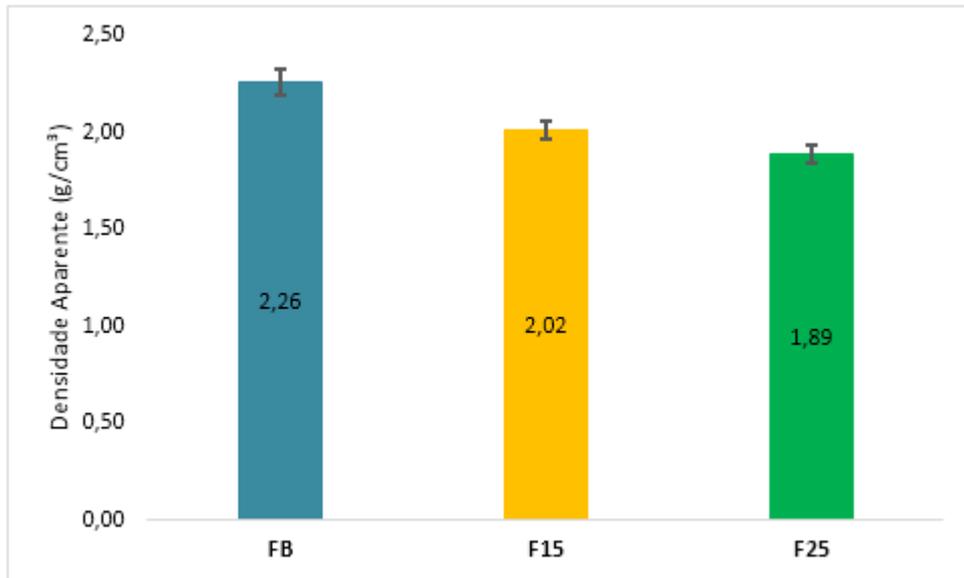
Fonte: Autor, 2018.

A resistência média atingida pela FB do CCR foi 7,70 MPa. Nas formulações com 15% de adição de cinza de madeira a média caiu 51,69%, e para o teor de 25% do resíduo essa queda foi de 61,58%. Observa-se que a medida que o teor de cinzas cresce, a resistência diminui, esse comportamento foi previsto em estudo realizado por Udoeyo *et al.* (2006), onde concluiu que a resistência à compressão diminuiu entre 9% e 38% com o aumento da presença de cinzas.

4.4 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

As determinações do ensaio de Arquimedes foram feitas a partir de três pedaços de cada CP. O Gráfico 5 ilustra os valores de densidade aparente de cada formulação, com seus respectivos desvios padrões.

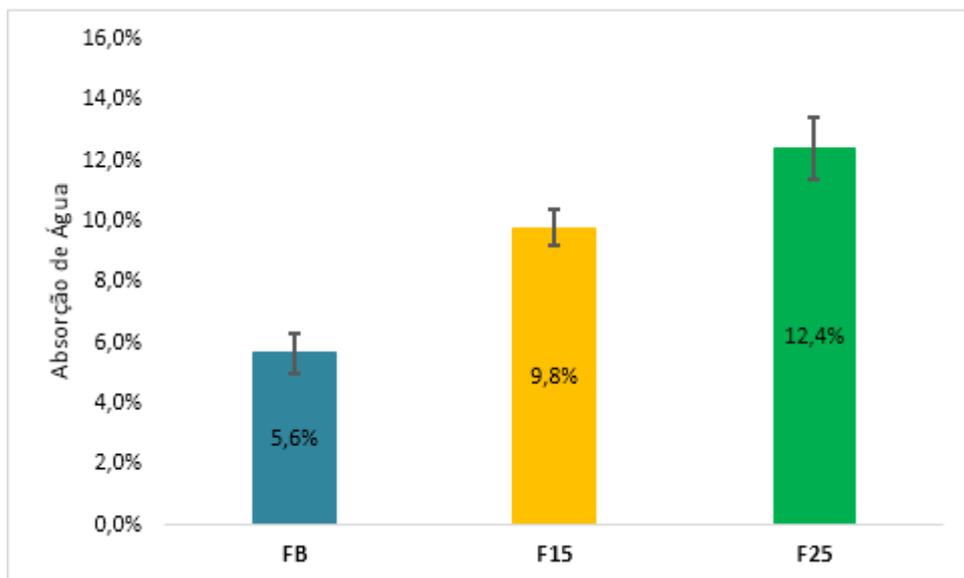
Gráfico 5 - Densidade aparente do CCR.



Fonte: Autor, 2018.

A densidade aparente média do CCR em sua FB foi 2,26 g/cm³. Com a adição de 15% de cinzas houve um decréscimo de 10,62% e com 25% de cinzas essa queda passou para 16,37%. Nota-se que o aumento da quantidade de cinzas na mistura provoca a redução na densidade aparente do concreto. Essa redução pode estar relacionada à maior absorção de água das misturas com cinza, como mostra o Gráfico 6, visto que a água presente evapora formando um vazio.

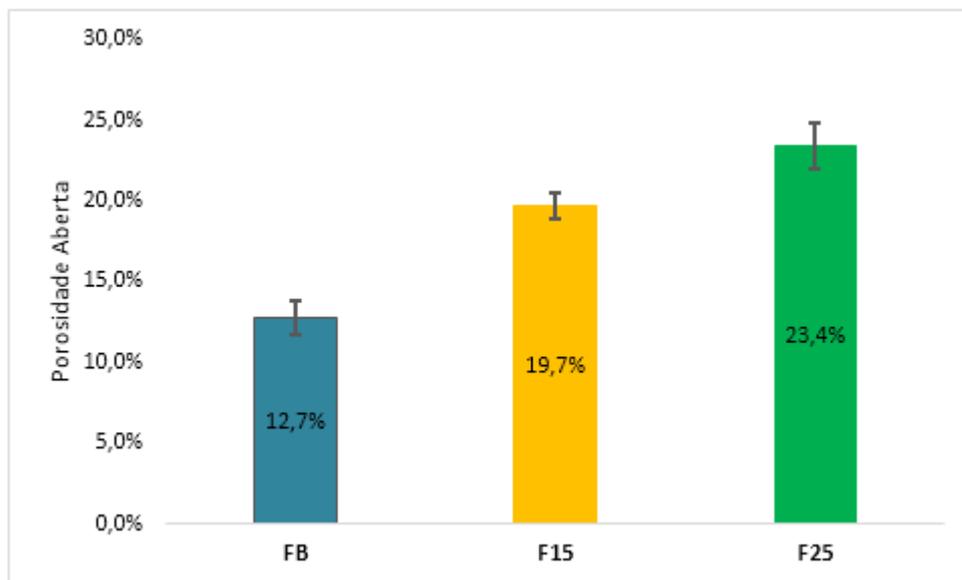
Gráfico 6 – Absorção de água do CCR.



Fonte: Autor, 2018.

A absorção de água média foi 5,6% para a FB, 9,8% para F15 e 12,4% para F25. Houve um crescimento significativo da absorção de água de 75% para F15 e 121,43% para F25. De forma semelhante aos resultados de Aghabaglou *et al.* (2013) e Udoeyo *et al.* (2006), quanto maior foi a presença de cinza de madeira na mistura, maior se tornou a absorção de água do material. Uma das razões para crescimento na absorção de água pode estar atribuída à grande absorção de água pela cinza de madeira. O Gráfico 7 ilustra os resultados de porosidade aberta das misturas.

Gráfico 7 – Porosidade aberta do CCR.



Fonte: Autor, 2018.

A porosidade aberta na FB de CCR foi de 12,7%. Já para as formulações que continham cinzas o resultado ficou em 19,7% para F15 e 23,4% para F25, ou seja, crescimentos de 55,12% e 84,25%. O aumento da porosidade aberta pode estar relacionado ao fato de que a absorção de água da cinza é 32,5% enquanto a do pó-de-pedra é 12,5%, logo, a água absorvida gerará vazios no concreto endurecido por onde transitarão fluidos posteriormente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados dos ensaios realizados foi possível estabelecer algumas correlações. Como previsto por Udoeyo *et al.* (2006) a resistência à compressão do concreto diminui com o aumento das cinzas. Uma das possíveis causas para a diminuição da resistência à compressão é o fato de as partículas de cinzas de madeira atuarem como material de preenchimento na mistura e não como material ligante.

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

Segundo Huang *et al.* (2009) baixa resistência está associada a alta porosidade. Logo, outra razão para a diminuição da resistência à compressão das misturas com cinzas foi a alta porosidade apresentada pelas mesmas.

A maior porosidade aberta e maior absorção de água podem estar relacionadas à compactação, como conclui Aghabaglou *et al.* (2013). Por ser feita manualmente não é possível garantir que a mesma força seja aplicada para cada CP, bem como a menor umidade das misturas com cinza influenciam nessa etapa.

As misturas com presença de cinza apresentaram maior porosidade aberta e absorção de água, fato justificado pelo percentual de absorção de água verificado no ensaio das cinzas que ultrapassa o dobro do percentual de absorção encontrado para o pó-de-pedra, que conseqüentemente após secagem pode gerar poros, espaços e fissuras no concreto, como apontam Botelho e Ferraz (2016).

Conclui-se que para a umidade utilizada não é possível a aplicação do CCR com cinzas como sub-base de pavimento rígido. No entanto, tendo em vista que as formulações com adição de cinzas absorve mais água que a FB e a relação água/cimento foi mantida a mesma, é possível que aumentando a relação água/cimento o cimento seja melhor hidratado e a resistência seja aumentada.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliação da resistência à compressão diametral e resistência à tração na flexão;
- Estudo com porcentagens entre 0% e 15% de substituição do agregado miúdo por cinza de madeira;
- Estudo de dosagem para atingir a umidade ótima da mistura com cinza de madeira garantindo o equilíbrio para a boa compactação;
- Verificar o índice de atividade pozolânica da cinza in natura e calcinada;
- Realizar ensaios de compressão aos 7 e 90 dias de vida do CCR;
- Realizar o mesmo estudo utilizando compactação mecânica para avaliação comparativa.

REFERÊNCIAS

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

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R**: Cement and Concrete Terminology. Farmington Hills, MI, 2000.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?ID=767>>. Acesso em: 03 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânico – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=331121>>. Acesso em: 11 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

_____. **NBR 16312-2:** Concreto compactado com rolo - Parte 2: Preparação em laboratório. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=333600>>. Acesso em: 11 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=2979>>. Acesso em: 11 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

_____. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=2882>>. Acesso em: 20 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/normavw.aspx?ID=55819>>. Acesso em: 26 abr. 2018. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

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

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. **DNER-ME 194:** Agregados – determinação da massa específica de agregados por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me194-98.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2018.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos.** 2 ed. 233 p. Rio de Janeiro, 2004.

_____. 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. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit056_2013_es.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2018.

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

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

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

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

CHEAH, C.B.; RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview**. Resources, Conservation and Recycling, 2011.

COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/802267.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

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

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

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

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

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

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: 04 abr. 2018.

HUANG, B.; HAO, W.; XIANG, S.; BURDETTE E.G. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete**. Elsevier Journal. Construction and Building Materials, 2009.

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

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.

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

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

SILVA, A. J. **Estudo da Viabilidade de Utilização da Cinza Pesada em Adição ao Concreto Compactado com Rolo (CCR) Destinado a Camada de Base de Pavimentos Híbridos**. 2006. 156 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2006.

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

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

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.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design – Roller-compacted Concrete: EM 1110-2-2006**. 2010. Disponível em: <<http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>>. Acesso em: 04 abr. 2018.