

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

KARINE DA VEIGA BAPTISTA

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIUDO POR CINZA DE MADEIRA EM
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Joinville

2018

KARINE DA VEIGA BAPTISTA

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIUDO POR CINZA DE MADEIRA EM
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

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

Orientadora: Me. Valéria Bennack.

Joinville

2018

KARINE DA VEIGA BAPTISTA

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIUDO POR CINZA DE MADEIRA EM
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Me. Valéria Bennack
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dra. Helena Ravache Samy Pereira
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais e minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que esteve no comando de tudo.

A mestra Valéria Bennack pela orientação nesse assunto desafiador e inovador. E também por transmitir sua calma e leveza quando o desespero tomava conta.

Aos colegas de laboratório que acompanharam e ajudaram quando possível. Em especial a Aline Achy pelos conhecimentos, preocupações e soluções compartilhadas.

Aos funcionários terceirizados da universidade, por sempre estarem dispostos a colaborar, inclusive em finais de semana e feriados.

Às empresas Votorantim, Geoforma, Perville, e a instituição Anhanguera, por ceder materiais, equipamentos e conhecimentos indispensáveis para realização desse trabalho.

Aos professores do Curso Engenharia Civil de Infraestrutura pelos conhecimentos ministrados de forma exemplar e também aos professores dos outros cursos que em algum momento fizeram parte dessa vida acadêmica e compartilharam seus conhecimentos.

À todos os amigos que fizeram parte dessa jornada da graduação. Muito obrigada, pelos altos e baixos e por todas as experiências e histórias que ficarão em minha memória e deixarão saudades.

À minha família que esteve presente em todos os dias da minha vida, dando suporte mesmo que de forma velada, mas que foram primordiais para conclusão de mais esta etapa. Em especial a minha mãe, Silvia da Veiga, que não mediu esforços para ajudar, é incrível a incansabilidade dessa mulher.

À minha irmã gêmea que lutou e caminhou junto nessa jornada, que sempre esteve disposta a conversar, dar colo e trazer paz quando tudo parecia perdido.

Ao meu amor e meu melhor amigo, que surgiu no ultimo tempo, mas que foi imprescindível para que esse final se tornasse mais leve. Francisco Hackbarth, obrigada por não medir esforços, por compartilhar seus conhecimentos na área da Engenharia Civil e me dar suporte nesta reta final. Você, sem dúvidas, tem uma parcela nessa minha vitória.

Ao meu chefe, Edgar Sandri, por todo o apoio, conhecimentos compartilhados e credibilidade depositada. Foram centenas de conversas que me estimularam, me ajudaram e me fizeram seguir em frente. Obrigada pela preocupação com a qualidade da minha vida acadêmica, prezando-a sempre acima das atividades da empresa.

E aos demais que aqui não foram mencionados, mas que estiveram de forma direta e indireta, com palavras de incentivo e colaborando para a conclusão desta etapa.

RESUMO

As indústrias que utilizam a queima de madeira como fonte de energia para sua empresa, produzem anualmente toneladas de resíduos, cinza da madeira. Apenas 30% desse resíduo possuem algum tipo de aplicação, os 70% restante são enviados para aterros industriais. Com base em trabalhos já realizados, viu-se a possibilidade de incorporá-lo nas misturas de concretos para pavimentos, ainda mais dentro do Brasil onde apenas 12,3% de toda a sua malha rodoviária é pavimentada, fornecendo ampla possibilidade para emprego desse resíduo. Pavimentos rígidos apesar de exigirem maiores custos de implantação, possuem baixos gastos com manutenção e maior tempo de vida útil. Então este trabalho estudou a viabilidade de substituição de 0, 10 e 15% da areia natural por cinza de madeira na mistura para Concreto Compactado com Rolo. A mistura para este tipo de pavimento é extremamente seca e a moldagem dos corpos-de-prova exige compactação obtida por equipamento semelhante ao utilizado no ensaio de Proctor, com CP feitos em 3 camadas e aplicados 30 golpes em cada. Todos os materiais utilizados neste trabalho foram caracterizados com base em ensaios e bibliografias de apoio. Foram produzidos 15 corpos-de-prova para cada traço possibilitando ensaios de compressão simples aos 7 e 28 dias de cura e também compressão diametral aos 28 dias de cura. Com as frações dos corpos-de-prova obtidos após os rompimentos, realizou-se o princípio de Arquimedes para obter as propriedades físicas desses concretos. Os resultados indicam viabilidade do uso de cinzas como substituto do agregado miúdo apresentando diminuição de resistência inferior a 5%. Fato que justifica a possibilidade de aprofundamento da pesquisa com alguns ajustes no traço, nas substituições, na granulometria variada dos agregados graúdos e alterar para um tipo de cimento com resistência mais elevada.

Palavras-chave: Cinza da madeira. Concreto. Pavimento. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The industries that use wood burning as a source of energy for their company, produce annually tons of waste, wood ash. Only 30% of this residue is of some type of application, the remaining 70% is sent to industrial landfills. Based on work already done, it has been possible to incorporate it into concrete mixes for pavements, even more so in Brazil, where only 12.3% of the entire road network is paved, providing a wide possibility of using this residue. Rigid floors despite demanding higher installation costs, have low maintenance costs and longer shelf life. Then this work studied the feasibility of replacing 0, 10 and 15% of the natural sand by wood ash in the mixture for Rolled Compacted Concrete. The mixture for this type of floor is extremely dry and the molding of the specimens requires compaction obtained by equipment similar to that used in the Proctor test, with CP made in 3 layers and applied 30 strokes in each. All the materials used in this work were characterized based on assays and supporting bibliographies. Fifteen specimens were produced for each trait, allowing simple compression tests at 7 and 28 days of cure and also diametrical compression at 28 days of cure. With the fractions of the specimens obtained after the disruptions, the principle of Archimedes was realized to obtain the physical properties of these concretes. The results indicated the feasibility of using ash as a substitute for the small aggregate with a decrease in resistance of less than 5%. This fact justifies the possibility of deepening the research with some adjustments in the trace, in the substitutions, in the varied granulometry of the large aggregates and to change to a type of cement with higher resistance.

Keywords: Wood ash. Concrete. Pave. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal típica do pavimento flexível.....	8
Figura 2 – Transmissão de esforços pela carga no pavimento flexível.....	19
Figura 3 – Transmissão de esforços pela carga no pavimento rígido.....	19
Figura 4 – Seção transversal típica do pavimento rígido.....	20
Figura 5 – Cimento CP II-Z 40 utilizado na mistura.....	7
Figura 6 – Areia natural utilizada na mistura	8
Figura 7 – Cinza da madeira utilizada na mistura	29
Figura 8 – Brita 0 utilizada na mistura	0
Figura 9 – Conjunto de peneiras a) areia natural e b) cinza da madeira e c) brita 0	1
Figura 10 – Aparelhos necessários para o ensaio Slump Teste.....	6
Figura 11 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão axial.....	7
Figura 12 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão diametral	9
Figura 13 – a) Frasco Chapman com água e areia natural, b) Leitura realizada	44
Figura 14 – Procedimento de ensaio: a) Molde com material compactado; b) Frasco Chapman com água e areia e c) Leitura após 5 dias de absorção	45
Figura 15 – a) Amostra compactada dentro do molde; b) Inserindo amostra pesada no recipiente e c) Mistura da água com a cinza da madeira.....	46
Figura 16 – Procedimento de ensaio: a) Peso agregado saturado com superfície seca; b) Peso agregado saturado e submerso e c) Peso após agregado seco em estufa	46
Figura 17 – a) Introduzindo areia no frasco Chapman e b) Momento de leitura após 45s.....	47
Figura 18 – Moldagem dos corpos-de-prova.....	49
Figura 19 – a) Cura primeiras 24h; b) CPs logo após desmolde e c) Cura final em imersão...	49
Figura 20 – Corpos-de-prova de CCR aos 7 dias de cura: a) Traço referência; b) 10% de cinzas e c) 15% de cinzas	50
Figura 21 – Corpos-de-prova de CCR aos 28 dias de cura: a) Traço referência; b) 10% de cinza e 15% de cinzas	51
Figura 22 – a) Preenchimento do cone; b) Aplicação dos 25 golpes por camada e c) Abatimento da mistura	52
Figura 23 – Processo do ensaio Arquimedes para as frações dos CPs: a) Peso após seco em estufa; b) Peso saturado com superfície seca e c) Peso saturado e submerso	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da geração de RSIs no Brasil (em t/ano)	3
Tabela 2 – Composição do cimento	8
Tabela 3 – Características físicas da cinza da madeira	29
Tabela 4 – Fatores de correção h/d	38
Tabela 5 – Características físicas da areia natural a partir da granulometria	41
Tabela 6 – Características físicas da cinza da madeira a partir da granulometria	42
Tabela 7 – Características físicas da brita 0 a partir da granulometria.....	43
Tabela 8 – Massa específica da areia natural	43
Tabela 9 – Absorção de água da areia natural	44
Tabela 10 – Absorção de água da cinza da madeira.....	45
Tabela 11 – Características físicas da brita 0	47
Tabela 12 – Teor de umidade da areia.....	47
Tabela 13 – Dosagem dos materiais para cada traço.....	48
Tabela 14 – Resistência à compressão axial para cada CP aos 7 dias.....	52
Tabela 15 – Resistência à compressão axial para cada CP aos 28 dias.....	53
Tabela 16 – Resistência à compressão diametral para cada CP aos 28 dias relacionando com a resistência à tração.....	55
Tabela 17 – Média dos resultados referentes ao ensaio de Arquimedes para todo os CPs.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSIs no Brasil - parcial	4
Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia natural	41
Gráfico 3 – Curva granulométrica da cinza da madeira	42
Gráfico 4 – Curva granulométrica da brita 0	43
Gráfico 5 – Média das resistências atingidas à compressão simples aos 7 dias	3
Gráfico 6 – Média das resistências atingidas à compressão simples aos 28 dias	4
Gráfico 7 – Média de resistências à compressão diametral aos 28 dias	5
Gráfico 8 – Densidade aparente dos Corpos-de-prova	7
Gráfico 9 – Absorção de água dos Corpos-de-prova	57
Gráfico 10 – Porosidade aberta dos Corpos-de-prova	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ONU - Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento criada pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas
MDF - Medium Density Fiberboard
CNT - Confederação Nacional do Transporte
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR – Concreto Compactado a Rolo
EM – Especificação de Material
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
TCU - Tribunal de Contas da União
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
RSIs - resíduos sólidos industriais
CP - Cimento Portland
PR – Paraná
SC – Santa Catarina
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina
CP – Corpo de prova
NBR – Norma Brasileira
ACI – American Concrete Institute
CaO – óxido de Cálcio
SiO₂ – Dióxido de Silício
AlO₃ – Óxido de Alumínio
K₂O – Óxido de Potássio
Fe₂O₃ – Óxido de Ferro
MgO – Óxido de Magnésio
SO₃ – Óxido Sulfúrico
TiO₂ – Dióxido de Titânio
P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo
mm – Milímetro

μm – Micrometro

m^3 – Metro cubico

cm^3 – Centímetro cubico

t/ano – Tonelada por ano

kg – Quilograma

km – Quilômetro

% – Porcentagem

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

g/cm^3 – Grama por centímetro cubico

g – Grama

ml – Mililitros

s – Segundos

h – Horas

π – Pi

h/d – Altura por diâmetro

MPa – MegaPascal

N – Newtons

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 MALHA VIÁRIA	17
2.2 PAVIMENTOS BRASILEIROS.....	17
2.2.1 Pavimentos Flexíveis.....	18
2.2.2 Pavimentos Rígidos	19
2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR).....	20
2.4 SUSTENTABILIDADE.....	21
2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	22
2.6 ADIÇÕES MINERAIS	24
2.7 CINZA DA MADEIRA	25
3. MATERIAIS E METODOS.....	27
3.1 MATERIAIS	27
3.1.1 Cimento	27
3.1.2 Água	28
3.1.3 Agregado Miúdo – Areia natural.....	28
3.1.4 Resíduo - Cinza da madeira.....	29
3.1.5 Agregado graúdo - Brita 0.....	29
3.2 METODOS.....	30
3.2.1 Distribuição granulométrica	30
3.2.2 Massa específica agregado miúdo – areia natural	32
3.2.3 Absorção de água do agregado miúdo – areia natural.....	33
3.2.4 Absorção de água do resíduo – cinza da madeira.....	33
3.2.5 Teor de umidade superficial do agregado miúdo – Areia natural	34
3.2.6 Massa específica e absorção de água do agregado graúdo – brita 0.....	35
3.2.7 Definição da Dosagem.....	35
3.2.8 Produção dos corpos de prova	36
3.2.9 Consistência.....	36
3.2.10 Resistência à compressão simples	37
3.2.11 Resistência à tração por compressão diametral	38
3.2.12 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água	40

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 GRANULOMETRIA	41
4.1.1 Areia	41
4.1.2 Cinza da madeira	42
4.1.3 Brita 0	42
4.2 MASSA ESPECIFICA DO MATERIAL	43
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	44
4.3.1 Absorção areia	44
4.3.2 Absorção cinza da madeira.....	45
4.4 ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA BRITA 0.....	46
4.5 TEOR DE UMIDADE AREIA	47
4.6 DEFINIÇÃO DE DOSAGEM	48
4.7 CORPOS-DE-PROVA	48
4.6 CONSISTÊNCIA	51
4.8 ENSAIO DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	52
4.9 ENSAIO DE RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	54
4.10 DENSIDADE APARENTE, POROSIDADE ABERTA E ABSORÇÃO DE ÁGUA....	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

A Terra possui inúmeras fontes de energia, que vem sendo extraídas de forma desordenada pelo homem, sem oferecer possibilidades para que a mesma se recupere. Em 1983, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento criada pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) lançou um novo conceito, o de desenvolvimento sustentável. “[...] significa suprir as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras atenderem também às suas.” (ONU, 1987. p. 9).

As propostas de desenvolvimento sustentável buscam produzir em números iguais ou superiores, no entanto utilizando tecnologias que permitam retirada de matéria-prima de forma menos agressiva ao meio ambiente, diminuindo a produção de resíduos ou proporcionando reutilização. (ONU, 1987. p. 9). Ao trazer essa visão para o campo produtor brasileiro, pensou-se nos resíduos provenientes da queima da madeira como fonte de energia para empresas.

Segundo dados da Revista da Madeira (2003), desde 1966 se iniciou o plantio de extensas áreas de eucalipto, pinus e araucária, para produzir madeira para as indústrias de celulose e papel, chapas de fibras e carvão siderúrgico. Em 1984 já se registrava 5,5 milhões de hectares de áreas reflorestadas. Esse grande plantio para produzir madeira para as indústrias de celulose e papel, de chapas de fibras e para produzir carvão siderúrgico (Revista da Madeira, 2004). Segundo Bardini (2008), a queima da casca da madeira produz resíduos na ordem de 2,57 kg de cinzas para a produção de 1m³ de chapas de Medium Density Fiberboard (MDF), com geração anual estimada de 4300 toneladas.

A construção civil admite vários processos de reutilização de resíduos, uma área a desenvolver, que dispõe de grande demanda de material é a da pavimentação rodoviária. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), apenas 12,3% das rodovias brasileiras são pavimentadas (211.468km de 1.720.756km), trazendo uma ampla possibilidade de trabalho.

Os pavimentos podem ser divididos basicamente em: Flexível e Rígido. Pavimentos flexíveis, os mais utilizados no Brasil, são executados normalmente com revestimento de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Levam essa designação por serem compostos por várias camadas que fletem devido às cargas do tráfego. Já os pavimentos rígidos são constituídos por revestimentos com elevada rigidez em relação às camadas inferiores, e por isso absorvem boa parte das tensões provenientes do tráfego. São pouco deformáveis e constituídos, principalmente, por concreto de cimento Portland (CNT, 2017).

Winckler (2015) concluiu em suas pesquisas após variados testes e ensaios, que a cinza de Pinus não pode ser classificada como um material pozolânico (propriedades cimentícias) mas tem grande potencial de uso como adição mineral, apresentando granulometria adequada para contribuir como filler na mistura de concreto.

A partir disso, este trabalho propõe utilizar as cinzas da madeira como substituição em parte da areia natural (material que atua como agregado miúdo) na mistura de concreto para pavimentos rígidos, utilizando a técnica de Concreto Compactado com Rolo (CCR).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo substituir o agregado miúdo por cinza da madeira nas misturas de CCR para pavimentos rígidos, uma alternativa para a indústria de pavimentação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir o traço referência para o CCR;
- Confeccionar corpos-de-prova CCR, com substituição de 0%, 10% e 15% da areia natural por cinza de madeira;
- Realizar ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias;
- Realizar ensaios de resistência à compressão diametral aos 28 dias;
- Determinar características físicas (densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água) dos corpos-de-prova realizados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MALHA VIÁRIA

A malha viária do país é formada por rodovias federais, estaduais e municipais. A principal escolha para transporte dentro do território brasileiro é por vias rodoviárias, utilizadas por veículos particulares, coletivos ou de carga, sendo que nelas trafegam cerca de 90% dos passageiros e 60% das cargas brasileiras (CNT, 2017).

2.2 PAVIMENTOS BRASILEIROS

Segundo dados da pesquisa realizada pela (CNT, 2017) apenas 12,3% das rodovias brasileiras são pavimentadas (211.468km de 170.756km), ocupando a 111ª posição no ranking de densidade da malha rodoviária pavimentada por país.

O baixo número de vias pavimentadas não indica boa qualidade das mesmas, como revelou os estudos da CNT (2017). Os relatórios do Tribunal de Contas da União (TCU, 2013) apontam que problemas começam a surgir no pavimento apenas sete meses depois da entrega da obra, sendo que são projetadas para durar entre 8 a 12 anos. Exemplos de problemas no pavimento retirados do estudo da CNT (2018): fissuras principalmente devido à má dosagem do asfalto, trincas de fadiga devido ao acúmulo das solicitações do tráfego ao longo do tempo, afundamentos (deformação permanente plástica) devido a fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento, ondulações devido à falta de estabilidade da mistura asfáltica ou excessiva umidade do solo, escorregamentos devido a falhas construtivas, exsudação devido a excessiva quantidade de ligante e baixo conteúdo de vazios, e desgastes no geral.

O pavimento asfáltico como explica Franco (2007), visa assegurar que as repetidas passagens de veículos não causem a falha da camada de revestimento por fadiga e garantir que as espessuras das camadas das estruturas, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda. Mas como mostra o estudo realizado pela (CNT, 2017) a metodologia utilizada pelo Brasil para projetar rodovias tem uma defasagem de quase 40 anos em relação a países como Estados Unidos, Japão e Portugal.

O método de dimensionamento para pavimentos flexíveis utilizado atualmente não contempla os efeitos de fadiga, segundo Motta (1991) a origem do método foi estabelecido em bases estritamente empíricas, onde a experiência era codificada de forma direta e simples, em

determinadas regiões de geologia e natureza dos solos conhecidas e com algumas breves características de tráfego.

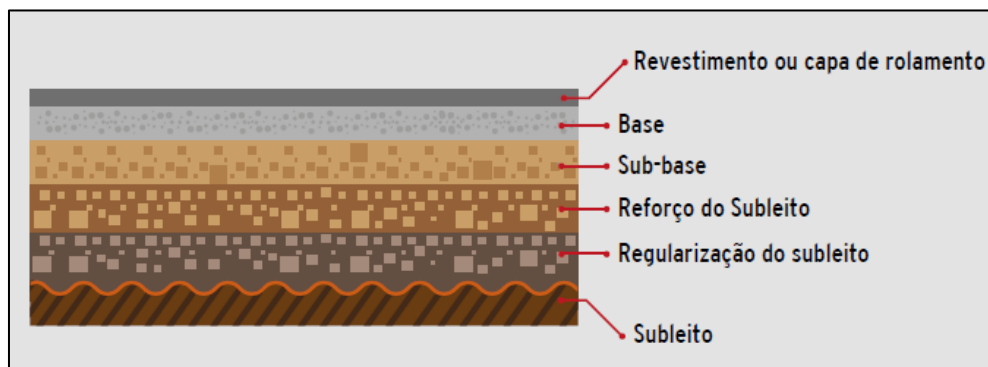
Franco (2007) concluiu que o dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos é um processo que envolve o conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem, tais como características dos materiais de pavimentação, comportamento desses em relação à aplicação das cargas, próprio carregamento e tipo de resposta da estrutura para suportar as cargas sob todas as variações das condições climáticas, e o projetista não tem conhecimento exato desses fatores, dimensionando com parâmetros médios e adotando um grau de risco estatístico considerado aceitável.

2.2.1 Pavimentos Flexíveis

Pavimentos flexíveis são os mais utilizados no Brasil, sendo 99% do total e executados normalmente com revestimento de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) sendo que levam essa designação por serem compostos por várias camadas que fletem devido às cargas do tráfego. Geralmente uma seção de pavimento flexível, é composta de 3 a 6 camadas (Subleito, Regularização do Subleito, Reforço do subleito, Sub-base, Base e Revestimento) conforme representado na Figura 1, onde cada uma possui características específicas (CNT, 2017).

Levam essa designação por serem compostos por várias camadas

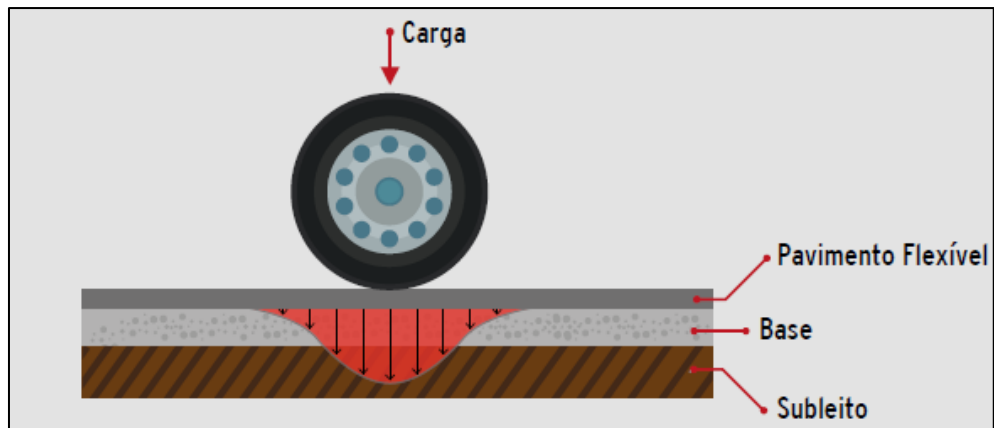
Figura 1 - Seção transversal típica do pavimento flexível.



Fonte: CNT (2017).

O conjunto formado pelas camadas no pavimento flexível precisa receber os esforços oriundos do tráfego e transmiti-los para as camadas inferiores de forma aliviada, conforme representação esquemática na Figura 2 (CNT, 2017).

Figura 2 - Transmissão de esforços pela carga no pavimento flexível.

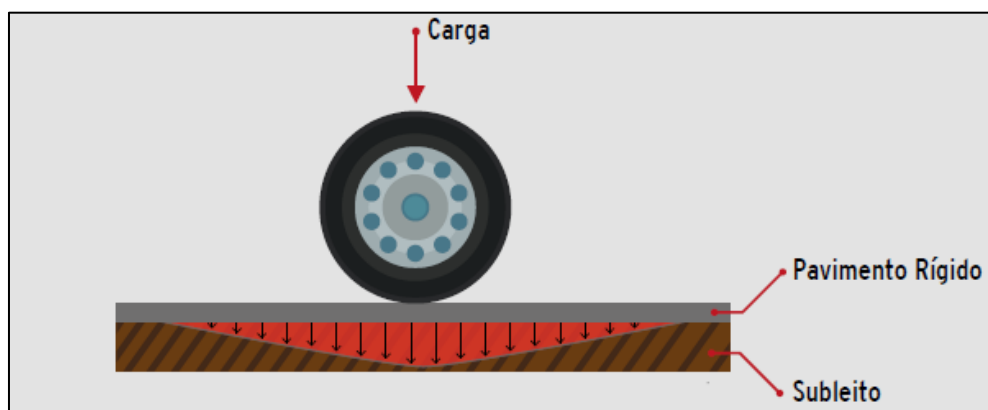


Fonte: CNT (2017).

2.2.2 Pavimentos Rígidos

Pavimentos rígidos são constituídos por revestimentos com elevada rigidez em relação às camadas inferiores, e por isso absorvem grande parte das tensões provenientes do tráfego, são pouco deformáveis e constituídos, principalmente, por concreto de cimento, conforme representação esquemática na Figura 3 (CNT, 2017).

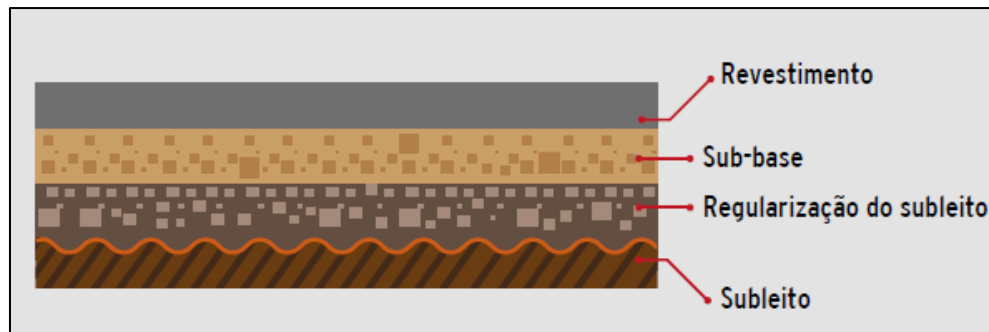
Figura 3 - Transmissão de esforços pela carga no pavimento rígido.



Fonte: CNT (2017).

Esse tipo de pavimento tem necessidade de menor número de camadas, pois a placa de concreto atua como base e revestimento, Figura 4 (CNT, 2017).

Figura 4 - Seção transversal típica do pavimento rígido.



Fonte: CNT (2017).

Para o dimensionamento dos pavimentos de concreto são adotados métodos distintos para cada tipo escolhido e da mesma forma possuem seus próprios processos executivos (CNT, 2017).

Os pavimentos rígidos são classificados como (DNIT, 2006):

Pavimentos Rígidos	}	Pavimento de concreto simples
		Pavimento tipo whitetopping
		Pavimento estruturalmente armado
		Pavimento de concreto compactado com rolo
		Pavimento com peças pré-moldadas

2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

Pavimentos rígidos necessitam de maior investimento para a sua implantação, podendo ser acima de 30% que o necessário para pavimentos flexíveis, porém esse custo é compensado pelo tempo de vida útil, que atinge de 10 a 20 anos a mais e nos custos de manutenção que ocorrem em menor frequência, como apontam estudos da CNT (2017).

O concreto do pavimento é um concreto de consistência seca, compactada por meio de rolos compressores (concreto rolado), não armado, que desempenha simultaneamente as funções de base e de revestimento. A sua composição deve ser determinada por método racional, de modo a obter-se com os materiais disponíveis, uma mistura fresca, de trabalhabilidade adequada, para ser compactada com rolo liso vibratório, resultando em produto endurecido com grau de compactação e resistência à compressão exigidos por Norma. (Norma DNIT 059/2004-ES, p. 2).

Mesquita (2001) salienta em seu trabalho que o pavimento rígido exerce simultaneamente a função de superfície de rolamento e camada estrutural, distribuindo

uniformemente as tensões solicitantes, transmitindo menores deformações para as camadas inferiores, exigindo, menor capacidade de suporte do subleito, sendo interessante para locais de solos frágeis.

Ainda por Mesquita (2001), o baixo emprego do pavimento rígido, se deve a pouca experiência de uso no Brasil, em comparação com pavimento flexível, pois antigamente continha elevado custo benefício em razão do asfalto ser vendido a preços subsidiados por ser considerado um subproduto. Trichês e Silva (2005) afirmam que a pequena utilização do CCR em camadas de pavimento se deve principalmente por ele ser empregado em grande escala na construção de barragens.

Conforme a norma DNIT 059/2004-ES, a composição do concreto é formada por cimento Portland, agregados (miúdos e graúdo), água e eventuais aditivos, não diferindo do concreto convencional, mudando apenas a quantidade de água empregada na mistura, devendo ser dosada cuidadosamente para a mistura não aderir nos rolos compressores.

Como Mehta e Monteiro (2008) explicam, o CCR diferencia-se do concreto convencional principalmente no requisito consistência para que não haja afundamento do equipamento de rolo vibratório, sendo úmido o suficiente para permitir a distribuição adequada da argamassa aderente no concreto durante as operações de mistura e compactação vibratória.

Os agregados utilizados no CCR raramente são maiores que 76 mm de diâmetro, porque podem causar problemas no espalhamento e na compactação da camada, escolhendo uma dimensão máxima em torno de 38 mm. O uso de material mais fino do que 75 μ m (peneira N^o200), produz uma mistura muito coesa com a redução do volume de vazios. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O CCR é um concreto de abatimento zero cujas propriedades dependem das dosagens e da qualidade de compactação. Moldar amostras para misturas de consistência seca muitas vezes exige compactação por impacto, que pode ser obtida com uso de equipamento semelhante ao utilizado no ensaio de Proctor modificado para solos, sendo necessário muito cuidado ao selecionar a energia de compactação volumétrica, pois se for muito baixa, a amostra pode desenvolver camadas indesejadas, se for muito alta o agregado pode quebrar (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.4 SUSTENTABILIDADE

Desenvolvimento sustentável não é um estado permanente de harmonia, mas um processo de mudança no qual a exploração dos recursos, a orientação dos investimentos, os

rumos do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão de acordo com as necessidades atuais e futuras (ONU, 1987, p. 10).

Goldemberg e Lucon (2007) abordam o tema com o conceito da chamada *pegada ecológica* que mede a área produtiva necessária para propiciar os recursos que são utilizados e assimilar os rejeitos produzidos. Em 1999 a *pegada ecológica* de cada habitante do planeta era de 2,3 hectares (23mil m²), sendo estimada para 2050 essa *pegada* por habitante um valor que corresponde ao dobro da capacidade da Terra.

Segundo a Global Footprint Network (2018), em 1º de agosto de 2018 foi atingido o “Dia de Sobrecarga da Terra”, ou seja, nesta data, a humanidade utilizou mais da natureza do que o planeta é capaz de renovar no ano inteiro. Usando mais recursos e serviços ecológicos do que a natureza pode regenerar, devido sobrepesca, exploração excessiva de florestas e emissão de mais dióxido de carbono na atmosfera do que os ecossistemas podem absorver. Viver dentro dos meios do nosso planeta é possível, existem muitas soluções em quatro áreas principais para melhorar a sustentabilidade: alimentação, cidades, população e energia (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2018).

É preciso fazer opções de produção, mas sabendo que a escolha de uma estratégia energética determinará inevitavelmente na escolha de uma estratégia ambiental. A indústria e seus produtos exercem um impacto sobre a base de recursos naturais da civilização ao longo de todo o ciclo de exploração de matérias-primas, sua transformação em produtos, consumo de energia, formação de resíduos, uso e eliminação dos produtos pelos consumidores (ONU, 1987, p. 232-233).

Muitos consideram que o crescimento industrial inevitavelmente se faz acompanhar de aumentos no consumo de energia e no consumo de matéria-prima, porém nos últimos dois decênios esse padrão mudou. A produtividade e a eficiência no tocante aos recursos estão em constante aperfeiçoamento, trazendo mais eficiência ao processo, consumindo menos matéria-prima (ONU, 1987, p. 240-241).

Administradas com cautela, as tecnologias novas e emergentes oferecem imensas oportunidades para elevar a produtividade e os padrões de vida, melhorar a saúde e conservar a base de recursos naturais (ONU, 1987, p. 242).

2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Goldemberg e Lucon (2007) mostram que da energia consumida pela população 35% é proveniente do Petróleo, 23% do carvão e 22% de gás natural, 7% de energia nuclear e os

13% restante de fontes renováveis, sendo 9% desses de biomassa tradicional, basicamente lenha queimada, 2% de energia hidrelétrica e 2% de eólica.

É relevante destacar que o uso de resíduos industriais como novos insumos para processos produtivos demanda de uma previa caracterização dos novos produtos principalmente quanto a sua estabilidade no ambiente. A realização de processos que envolvem a produção de asfalto, telhas e cimento, entre outros produtos considerados incorporadores de resíduos devem estar atentos quanto a atender as exigências de qualidade impostas por Leis e Normas (INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA - IPEA, 2012).

IPEA (2012), realizou um levantamento de dados referentes a resíduos sólidos industriais (RSIs), com base em bancos de dados e inventários disponíveis na internet, chegando aos valores expostos na Tabela 1.

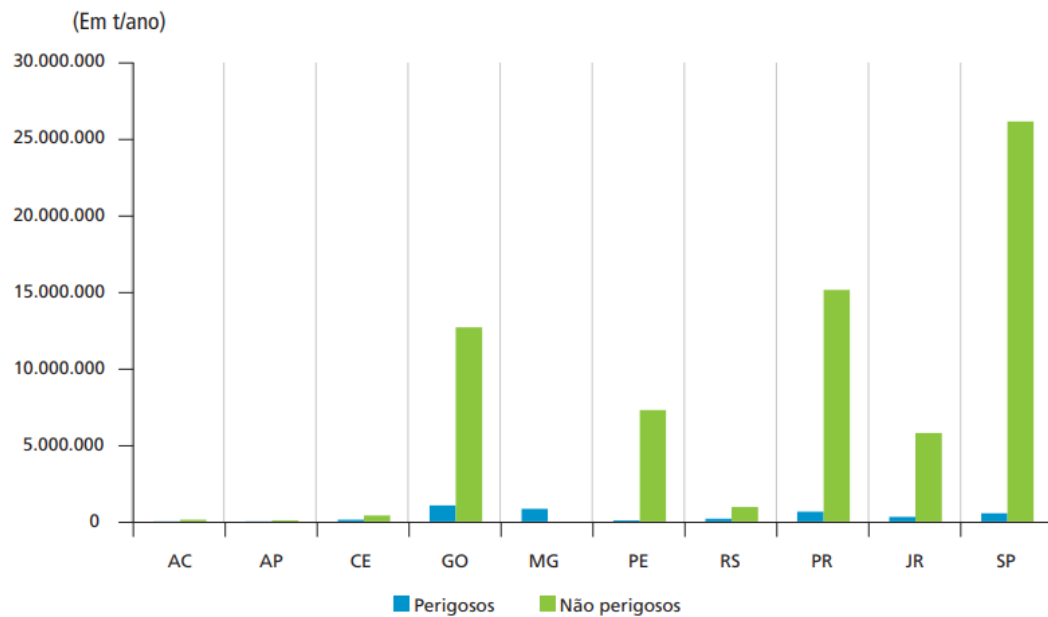
Tabela 1 - Dados da geração de RSIs no Brasil (em t/ano).

Estados	Perigosos	Não perigosos	Total
AC	5500	112765	118265
AP	14341	73211	87552
CE	115238	393831	509069
GO	1044947	12657326	13702273
MT	46298	3448856	3495154
MG	828183	14337011	15165194
PB	657	6128750	6129407
PE	81583	7267930	7349513
PR	634543	15106393	15740936
RN	3363	1543450	1546813
RS	182170	946900	1129070
RJ	293953	5768562	6062515
SP	535615	26084062	26619677
Total	3786391	93869047	97655438

Fonte: Adaptado de Ipea (2012).

Os estados não presentes na tabela foram por falta de acesso aos dados. Possível visualizar a diferença de produção de resíduos entre estados no Gráfico 1 (IPEA, 2012).

Gráfico 1 - Geração de RSIs no Brasil - parcial



Fonte: Ipea (2012).

Conforme a norma ABNT/NBR 10004 (2000) explana, os resíduos possuem uma classificação entre Classe I – perigosos e Classe II – não perigosos:

Classe I – apresentam periculosidade, a saúde pública, provocando morte e incidência de doença, e riscos ao ambiente. Possuem características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Classe II A – não inertes, podendo ter propriedades de biodegradabilidade, de combustibilidade e de solubilidade em água.

Classe II B – inertes, resíduos que quando amostrados de uma forma representativa, segundo as normas ABNT/NBR 10006 (2006) e ABNT/NBR 10007 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.6 ADIÇÕES MINERAIS

Adições minerais são quaisquer materiais que não seja a água, os agregados e os cimentos hidráulicos ou fibras. Usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura (Moraes, 2014). Fonseca (2010) aponta que

atualmente grande parte das adições minerais é composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termoeletricas e industriais.

Como Dal Molin (2005) explica, as adições minerais são classificadas conforme a sua ação físico-química:

- **Material Pozolânico:** material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só não possui propriedade cimentícia mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. (Ex: Cinza volante com baixo teor de cálcio, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim)
- **Material Cimentante:** não precisa da presença do hidróxido de cálcio no cimento Portland para formar produtos cimentantes. Porém sua hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação em fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição do cimento Portland, a presença do hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação. (Ex: Escoria granulada de alto forno)
- **Filler:** não possui atividade química, apenas efeito físico de empacotamento granulométrico, possibilitando o preenchimento de vazios entre partículas, e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. (Ex: Calcário, pó de quartzo, pó de pedra).

Adições minerais são amplamente utilizadas nas dosagens de CCR, o uso de grandes quantidades de adições minerais reduz tanto a temperatura adiabática quanto os custos e melhora da durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda o ACI Committe 212 lista algumas finalidades importantes para as quais as aditivos/adições são usadas, como: aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o consumo de água, reduzir a exsudação e a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar as taxas de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, reduzir a taxa de evolução do aquecimento e aumentar a durabilidade do concreto em condições específicas de exposição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.7 CINZA DA MADEIRA

A queima da madeira para gerar energia em forma de calor, produz elevada quantidade de resíduos, dentre eles a cinza de fundo - depositadas nas esteiras - e a cinza volante - captadas em filtros de saco ou dispositivos semelhantes (BENNACK, 2016). Bardinni (2008) aponta a

elevada produção de resíduo para 1m³ de chapas MDF, sendo 2,57kg de cinzas somando em um ano 4300 toneladas. Siddique (2012) menciona que apenas 30% das cinzas geradas possuem alguma aplicação, os 70% restante são depositados em aterros.

Conforme explica Siddique (2012), a cinza de madeira é um resíduo inorgânico e orgânico remanescente após a combustão da madeira, as folhas geralmente produzem mais cinzas do que a casca e a parte interna da árvore, em média a queima resulta em cerca de 6 a 10% de cinzas. As cinzas de resíduos de madeira têm essencialmente na sua composição: CaO, SiO₂, AlO₃, K₂O, Fe₂O₃, MgO, SO₃, TiO₂ e P₂O₅ (UDOEYO et al., 2006).

Existem vários fatores que têm um efeito significativo sobre aspectos qualitativos e quantitativos das cinzas de resíduos de madeira, produzidos da incineração de resíduos de madeira bruta (CHEAH; RAMLI, 2011). Um dos fatores, como salientam esses autores, é o tipo de tecnologia para a combustão da madeira que exerce influência significativa na propriedade física e química, pois tipos diferentes de fornos e incineradores têm variadas conversões térmicas.

Siddique (2012) determinou em seus estudos a composição físico-química e mineralógica básica das cinzas de madeira, verificando níveis de absorção de água e resistência quando submetido a compressão, a tração e a flexão, contração de secagem, resistência ao congelamento e descongelamento e lixiviação. Encontrando resultados como elevação da absorção de água e ligeira diminuição da resistência do concreto quando acrescido das cinzas.

Udoeyo (2006) utilizando as cinzas nas porcentagens dos 5% aos 30% encontrou perdas de resistência a compressão e diminuição da trabalhabilidade da mistura. Fato que indica a presença da cinza atuando como material de enchimento e não como cimentante.

Estudos realizados por Bardini (2008), Siddique (2012) e Bennack (2016) mostraram a possibilidade e a efetividade da substituição de parte do agregado miúdo pela cinza. Siddique (2012) concluiu em seu trabalho, que as cinzas de madeira podem ser usadas para fazer produtos pré-fabricados e concreto estrutural.

3. MATERIAIS E METODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a mistura, não se diferem dos utilizados no concreto convencional (cimento, agregados e água), e a escolha se restringe a disponibilidade desses materiais na região de Joinville/SC. Além da incorporação de um material incomum, a cinza da madeira, um resíduo proveniente da queima da madeira para geração de energia em indústrias.

3.1.1 Cimento

Para realização do concreto escolheu-se a utilização do cimento CP II-Z 40, como explica AEC (2018) é um cimento Portland Composto, assim conhecido por ter adições de diversos materiais em sua composição, conferindo a ele um menor calor de hidratação, algo levado em consideração já que a mistura deste trabalho possui baixos níveis de umidade. A Figura 5 apresenta uma amostra do material.

Figura 5 - Cimento CP II-Z 40 utilizado na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 2 apresenta a composição do produto obtida a partir da NBR 11578 (1991).

Tabela 2 - Composição do cimento.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			Norma Brasileira
		Clínquer +gesso	Material pozolânico	Material carbonático	
Composto	CP II-Z 40	94-76	6-14	0-10	NBR 11578

Fonte: Adaptada, ABNT NBR 11578 (1991).

3.1.2 Água

A água utilizada será diretamente da rede de abastecimento público da cidade, fornecido pela Companhia Águas de Joinville.

3.1.3 Agregado Miúdo – Areia natural

O ideal para ser utilizado nesse tipo de concreto seria o pó-de-pedra como a norma DNIT 056 (2013) sugere. Porém conforme estudos realizados por Nienkotter (2018) revelaram, trata-se de um material com elevada absorção de água, cerca de 13-15%, e apresenta razoável quantidade de finos em sua composição. Como a cinza da madeira também possui elevada absorção de água, o pó-de-pedra agrava a situação ao colaborar na diminuição da trabalhabilidade da mistura e também nas propriedades físicas (porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água) do concreto endurecido. Então optou-se pela utilização da areia natural, obtida na região de Joinville/SC. A Figura 6 apresenta uma amostra do material.

Figura 6 - Areia natural utilizada na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

3.1.4 Resíduo - Cinza da madeira

A cinza da madeira utilizada na mistura, é proveniente de uma indústria que fabrica produtos de madeira, localizada em Araucária/PR. Utilizam o que sobra das arvores de Pinus (cascas, galhos e folhas) nas fornalhas, para geração de energia, atingindo temperaturas de 800°C. Esse processo resulta nas cinzas de fundo (permanecem no fundo da fornalha) e nas cinzas volantes (são retidas pelos filtros), que são recolhidas e encaminhadas para aterros. A Figura 7 apresenta uma amostra do material.

Figura 7 - Cinza da madeira utilizada na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

A massa específica foi retirada do estudo realizado por Bennack (2016), Tabela 3.

Tabela 3 - Característica física da cinza da madeira.

Material	Massa específica
Cinza da madeira	2,78 g/cm ³

Fonte: Modificado Bennack, 2016.

3.1.5 Agregado graúdo - Brita 0

Para a mistura de CCR foi utilizado a brita 0, mais popularmente conhecida como pedrisco, obtida na região de Joinville/SC, a Figura 8 apresenta uma amostra do material.

Figura 8 - Brita 0 utilizada na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

3.2 METODOS

A realização dos experimentos se constituirá de algumas etapas e a necessidade de diversas metodologias de trabalho. No Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC se caracterizou os materiais, para então realizar as misturas e produzir os corpos-de-prova de acordo com os requisitos de cada ensaio, também foram estudados a composição física estrutural dos CPs. Nos laboratórios da Perville e Faculdade Anhanguera foram rompidos os CPs, para obter suas resistências.

3.2.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica foi realizada a partir do ensaio de granulometria dos agregados. O procedimento foi realizado seguindo a norma ABNT/NBR NM 248 (2003) e para analisar os resultados a norma ABNT/NBR 7211 (2009).

Para executar o ensaio primeiramente foi necessário secar os granulares. Os materiais ficaram pouco mais de 24 h em uma estufa a 105°C. Seguindo a exigência de massa mínima para ensaio conforme NBR/NM 248 (2003) retirou da amostra seca de areia natural uma porção de 1000 gramas e da amostra de cinza de madeira, também, uma porção de 1000 gramas. A brita 0 foi obtida de uma empresa de Joinville/SC já lavada e seca, então apenas foi retirado da amostra uma porção de 2000 gramas, essa quantidade é pelo fato do material possuir dimensão máxima de 12,7mm. As porções ainda foram separada em duas partes para a realização do ensaio, ao final feito uma média e elaborando os gráficos.

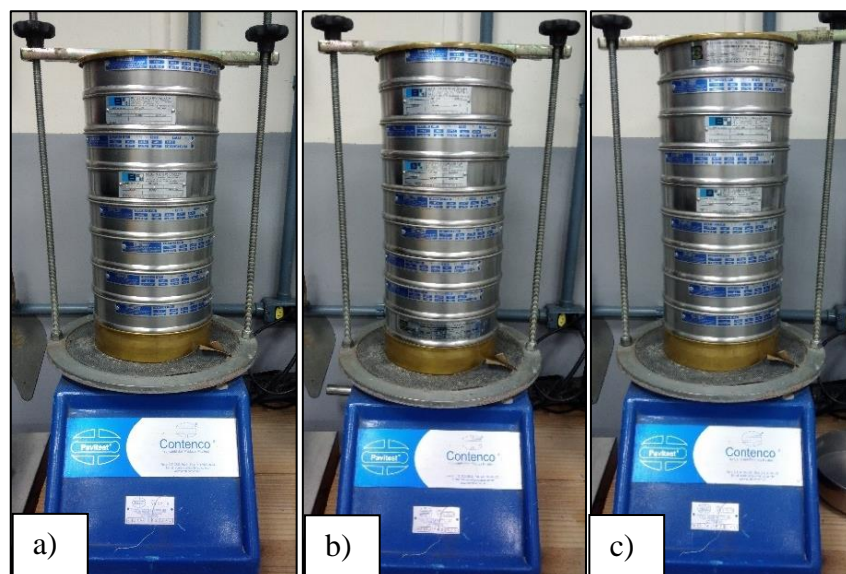
Após previamente limpas e pesadas, as peneiras foram encaixadas de modo a formar um único conjunto, com as aberturas de malhas na ordem crescente da base para o topo. Para o agregado miúdo, areia natural, foram utilizadas as peneiras 9,5mm-6,3mm-4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm e para completar o conjunto e ser possível o ensaio, adicionou-se fundo e tampa. Foi admitido o uso da peneira 6,3mm, apesar de ela não fazer parte da série normal, pelo fato de ser um diâmetro onde a possibilidade de retenção de partículas era alta e deixaria os resultados mais harmoniosos.

Para o agregado miúdo, cinza da madeira, foram utilizadas as peneiras 9,5mm-6,3mm-4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm-0,106mm e para completar o conjunto, adicionou-se fundo e tampa. Além de admitir o uso da peneira 6,3mm, foi incluída a de 0,106mm por se tratar de um material mais fino visualmente e grande possibilidade de partículas passantes na 0,15mm.

Para o agregado graúdo, brita 0, foram utilizadas as peneiras 12,7mm-9,5mm-6,3mm-4,75mm-2,36mm-1,18mm-0,6mm-0,3mm-0,15mm e para completar o conjunto, adicionou-se fundo e tampa. Esse ensaio também foi utilizado a peneira 6,3mm e além dela outra da série intermediária a 12,7mm, pois a de 19mm foi realizado ensaio manual e todos os grãos passaram sem dificuldade.

Na Figura 9, expõe-se os conjuntos de peneiras utilizados nos ensaios, para cada tipo de material.

Figura 9 - Conjunto de peneiras (a) areia natural; (b) cinza da madeira e (c) brita 0.



Fonte: Autor, 2018.

O processo do peneiramento através do agitador eletromagnético foi realizado da mesma maneira para os três materiais. As porções separadas de cada amostra, foram acrescentadas lentamente sobre a última peneira do conjunto, de maneira homogênea e então foram agitadas mecanicamente por 10 minutos. Após disso, o conjunto foi sendo desfeito e cada peneira agitada manualmente por 1 minuto, a parcela que passava era colocada na próxima peneira, e então pesada. Com esses valores foi possível traçar as curvas granulométricas.

Também a partir do resultado da granulometria e segundo norma ABNT/NBR 7211 (2009), foi calculado o módulo de finura e o diâmetro máximo. Módulo de finura é a soma das porcentagens de massa retida acumulada, nas peneiras da série normal, divididas por cem. Já o diâmetro máximo é a peneira na qual a porcentagem retida acumulada for menor ou igual a 5%.

3.2.2 Massa específica agregado miúdo – areia natural

É a relação entre a massa do agregado seco e o volume igual do sólido, incluindo os poros impermeáveis. Fez-se o ensaio com base na norma DNER-ME 194/98, utilizando o frasco de Chapman.

A porção de material escolhida para o ensaio foi seca em estufa a 105°C até constância de massa. Colocou-se água no frasco até a marca de 200 cm³ e o deixou em repouso, assim se alguma porção de água ficou aderida as paredes, pudesse escorrer. Após isso, introduziu 500g do agregado miúdo no frasco – com ajuda de funil para evitar que material ficasse retido nas paredes – e agitou o conjunto para que as bolhas de ar fossem eliminadas. Faz-se então a leitura do nível que a água atinge no gargalo do frasco, o que indica o volume em cm³ ocupado por água-agregado.

Com a leitura realizada, tem-se como utilizar a equação 1:

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

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³

L = leitura realizada no frasco

3.2.3 Absorção de água do agregado miúdo – areia natural

Para conseguir determinar a absorção foi executado o procedimento semelhante ao realizado por Bennack (2016). Para determinar um volume para a areia seca, utilizou-se um molde cilíndrico metálico com as dimensões 9x5cm. Com o auxílio de soquete, compactou-se o material, para o seu adensamento e encontro de um volume mais preciso.

Utilizando novamente o frasco Chapman, preencheu-se com água até a sua marcação de 200 cm³, esperou alguns instantes para que escorresse alguma porção de água presa nas paredes, logo após adicionando o volume de areia, com auxílio de funil. Após 5 dias em que a mistura ficou no frasco, foi realizado a leitura, garantindo que todas as partículas absorvessem água.

A absorção da areia é dada pela razão entre o volume de água absorvido e a soma do volume da água e do volume do agregado compactado, separadamente. Para melhor entendimento do cálculo, expõe-se as equações 2 e 3.

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

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

3.2.4 Absorção de água do resíduo – cinza da madeira

Baseou-se nos ensaios realizados por Bennack (2016), utilizando metodologia experimental desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção Civil de Ciências Tecnológicas da UDESC/Joinville.

Primeiramente separou-se 100g do material, previamente seco em estufa a 105°C. Colocou-se em um molde para determinar um volume, utilizando um molde metálico cilíndrico que possuía dimensões de 5x10cm. O preenchimento e a compactação realizados até a marca de 5cm, com ajuda de soquete. Após identificar o volume, pesou-se a amostra.

Optou por continuar o ensaio com um recipiente medidor comum, apenas para ficar mais claro a marcação da quantidade de água utilizada. Adicionou-se então 200 ml de água a temperatura ambiente. Logo após, foi adicionada a amostra e com o auxílio de uma haste de vidro misturou-se ambos.

O volume de água absorvido pelo resíduo é dado pela diferença volumétrica entre a amostra final (leitura realizada no recipiente) e a soma do volume de água com o volume do resíduo compactado separadamente. Abaixo, para melhor visualização do cálculo, encontra-se a equação 4.

$$Absorção = \frac{(V_{água} + V_{amostra})}{V_{total}} * 100 \quad [\%] \quad (4)$$

3.2.5 Teor de umidade superficial do agregado miúdo – Areia natural

Como a norma NBR 9775 (2012) explica, é um quociente percentual entre a massa de água aderente à superfície dos grãos do agregado e a massa do agregado na condição saturada de superfície seca. Importante ser determinada para garantir a correta relação água/cimento do concreto ou argamassa.

Ensaio executado conforme descrito pela norma NBR 9775 (2012), onde primeiramente adicionou-se água ao frasco Chapmann até a sua marca de 200 ml e deixando em repouso para que a água aderida as paredes internas pudessem escorrer. Em seguida introduziu-se com o auxílio de um funil 500g de areia natural úmida, agitando-se para a eliminação de bolhas de ar. Faz-se por fim a leitura, após ter deixado 45s o frasco sobre superfície plana e isenta de vibrações.

O teor de umidade superficial presente no agregado miúdo, deve ser calculado pela equação 5:

$$h = \frac{[500 - (v - 200) * \gamma]}{(v - 700) * \gamma} * 100 \quad (5)$$

Onde:

h: teor de umidade superficial, expresso em porcentagem (%) da massa de agregado miúdo na condição saturada de superfície seca (SSS).

v: leitura do frasco Chapman (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo), expresso em milímetros (mL).

γ : densidade na condição saturada de superfície seca (SSS) do agregado miúdo, expressa em gramas por milímetro (g/mL).

3.2.6 Massa específica e absorção de água do agregado graúdo – brita 0

Para se obter a massa específica e porcentagem de absorção do agregado graúdo (Brita 0) realizou-se os procedimentos descritos na norma ABNT/NBR NM 53 (2009). Separou-se uma amostra de 2000 gramas e submersa em água por 24h. Após esse período, secou a superfície com pano limpo e pesou a massa do material saturado com a sua superfície seca (m_s). O mesmo material, então, foi pesado submerso (m_a). Por fim, secou-se em estufa a 105°C e pesou-se sua massa seca (m).

Para obter a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/m^3) foi utilizado a equação 6.

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

Para obter a massa específica aparente do agregado seco (g/m^3) foi utilizado a equação 7.

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

Para obter a absorção do agregado (%) foi utilizado a equação 8.

$$A = \frac{m_s - m}{m} 100 \quad (8)$$

3.2.7 Definição da Dosagem

Para a produção dos corpos-de-prova foi considerado o estudo de Triches e Silva (2005), que considera a quantidade de cimento por m^3 de CCR, índice de vazios e a massa específica do cimento e do agregado. O consumo de cimento para este estudo foi fixado em 120kg/m^3 - maior dosagem permitida segundo a norma DNIT 56 (2013) – e a umidade fixada em 6,5%, resultando no traço 1:7:7:0,975 de massa.

3.2.8 Produção dos corpos de prova

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

Primeiramente foram pesadas as quantidades de cada material necessário, sendo definidas com base no volume do molde e quantidade de moldes. Seguindo a norma DNIT 56 (2013), moldou-se os corpos de prova em tamanhos de 10x20cm em três camadas de alturas aproximadamente iguais e compactadas com soquete de 4,5 kg e altura de queda de 45 cm, recebendo cada camada 30 golpes. A última camada sempre sobrepassando ligeiramente do topo do molde, pois o movimento e energia de compactação colaboram para a perda de material.

Conforme a norma DNER-ME 046/098 explica, os corpos-de-prova foram colocados sobre superfície plana, livre de choques e vibrações, curaram por 24 horas cobertos com material não reativo e não absorvente, para evitar a perda de água e protegido de intempéries. Após desmoldados, ficaram imersos em água saturada de cal até a cura final – 7 e 28 dias.

3.2.9 Consistência

Foi realizado o slump test para cada traço seguindo a norma NBR NM 67 (1998), onde especifica os aparelhos e procedimentos do ensaio. Aparelhos: (a) molde de metal com bases superior e inferior abertas e paralelas, possuindo duas alças na parte superior e aletas na parte inferior para mantê-lo estável; (b) haste de compactação feita de aço com seção circular de 16mm de diâmetro e 600mm de comprimento; (c) Placa de base metálica, plana e retangular, Figura 10.

Figura 10 - Aparelhos necessários para o ensaio slump test.



Fonte: Autor, 2018.

Primeiramente os aparelhos foram umedecidos para depois preencher o molde com o concreto (operador, sempre, mantendo os pés sobre as aletas para mantê-lo estável), o preenchimento realizado em três camadas, onde cada camada recebeu 25 golpes da haste utilizada para compactação. Por fim fez-se o arrasamento com movimentos rolantes da haste de compactação. Os resíduos do material da placa de base foram limpos e o molde foi tirado, levantando cuidadosamente na direção vertical. Toda a operação do ensaio foi completada em menos de 150 s, como aconselha a norma.

3.2.10 Resistência à compressão simples

Na Perville Engenharia e Empreendimentos, situada em Joinville/SC, realizou-se o ensaio de resistência à compressão simples de todos os corpos-de-prova utilizados neste trabalho. Com base na norma ABNT/NBR 5739 (2007) procedeu-se os ensaios e cálculo de resultados. Os corpos-de-prova foram rompidos em 7 e 28 dias, em prensa hidráulica, Figura 11.

Figura 11 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor, 2018.

O preparo dos corpos de prova seguiu a norma ABNT NBR 5738 (2015), para tornar as bases superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal. No processo de retificação dos corpos-de-prova foi realizada a remoção de uma camada fina de material de forma que

garantissem a integridade estrutural das camadas adjacentes a essa camada removida, e tornasse a base lisa e livre de ondulações e abaulamentos.

Posicionou-se o corpo-de-prova de modo que seu eixo coincidisse com o da máquina e a distância foi ajustada entre os pratos e aplicada a compressão com o equipamento até a ruptura do corpo-de-prova.

Com base no ensaio calcula-se a resistência do material pela equação 9:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (9)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão [MPa]

F: força máxima alcançada [N]

D: diâmetro do corpo-de-prova [mm]

Como os corpos-de-prova foram retificados, utilizou-se um fator de correção sobre a resistência encontrada por meio da equação acima exposta. Esse fator corresponde a relação h/d, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de correção h/d.

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87
Nota: Os índices correspondentes à relação h/d não indicada podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.					

Fonte: ABNT 5738, 2007.

A resistência para sub-base de concreto deve ser suficiente para garantir manuseio durante a fabricação, execução do pavimento e resistir as ações do tráfego. A norma DNIT 056 (2013) determina que aos 7 dias os corpos-de-prova devem atingir uma resistência no ensaio a compressão, realizado conforme a norma NBR 5739 (2007), maior ou igual a 5,0 MPa.

3.2.11 Resistência à tração por compressão diametral

Após a cura de 28 dias imersos em água, os corpos-de-prova referente aos três traços foram submetidos ao ensaio de compressão diametral. Tendo a norma NBR 7222 (2011) como

base, realizou-se o ensaio na Faculdade Anhanguera Joinville situada em Joinville/SC, Figura 12.

Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão diametral.



Fonte: Autor, 2018.

Primeiramente determinou-se o diâmetro utilizado para os cálculos pela média de duas medidas, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo-de-prova. A altura deve ser medida sobre seu eixo longitudinal.

Na prensa, coloca-se o corpo-de-prova de modo que fique posicionado ao longo de uma geratriz sobre os pratos do equipamento e devidamente ajustados para que mantenham na posição o corpo-de-prova, durante todo o ensaio.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela equação 10.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (10)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$: resistência à tração por compressão diametral [MPa]

F: força máxima obtida no ensaio [N]

d: diâmetro do corpo-de-prova [mm]

l: comprimento do corpo-de-prova [mm]

3.2.12 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Para se obter as propriedades físicas do concreto produzido, utilizou-se o princípio de Arquimedes, algo bem semelhante ao realizado para o agregado graúdo neste trabalho. Ensaio executado com pedaços provenientes dos corpos-de-prova rompidos aos 28 dias de cura. Esses pedaços foram primeiramente secos em estufa à 105°C por 24 h e pesados, registrando assim a sua massa seca (M). Depois os pedaços foram imersos em água por 72 h e registrada a sua massa imersa em água (M_a). E por fim, secos superficialmente e pesados registrando a sua massa saturada com superfície seca (M_{ss}).

Para obter a absorção de água dos fragmentos (%), utilizou-se a equação 11:

$$A = \frac{M_{ss} - M}{M} * 100 \quad (11)$$

Para obter a densidade aparente (g/cm^3), utilizou-se a equação 12:

$$D_{apar} = \frac{M}{M_{ss} - M_a} \quad (12)$$

E por fim, para se obter a porosidade aberta (%), utilizou-se a equação 13:

$$P_{aberta} = \frac{M_{ss} - M}{M_{ss} - M_a} * 100 \quad (13)$$

Ensaio realizado com vários fragmentos de cada traço, assim diminuindo a possibilidade de erros ou enganos.

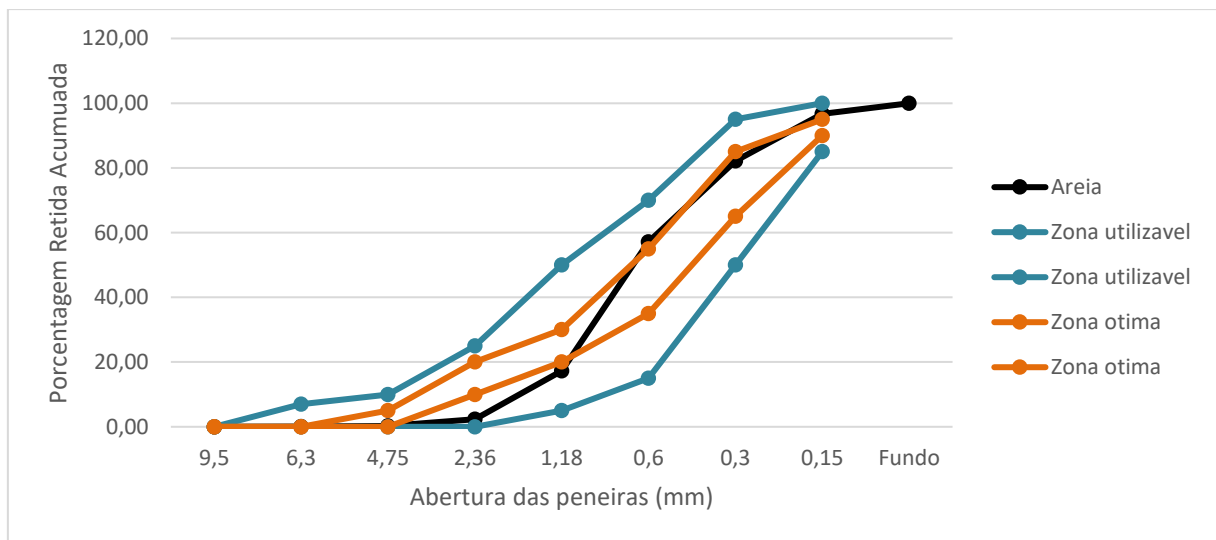
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GRANULOMETRIA

4.1.1 Areia

A partir de dados retirados do ensaio de granulometria do agregado miúdo, gerou-se o Gráfico 2. Observa-se que o material possui granulometria dentro da faixa considerada utilizável pela norma ABNT NBR 7211 (2009) para a produção de concreto, mais de 40% dela inclusive se encontra dentro da zona ótima. Outro ponto a ser observado é a continuidade da curva, ou seja, apresenta partículas de todos os diâmetros, melhorando o grau de empacotamento da mistura.

Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 5 apresenta algumas características físicas além da distribuição granulométrica, encontradas a partir do ensaio de granulometria.

Tabela 5 - Características físicas da areia natural a partir da granulometria.

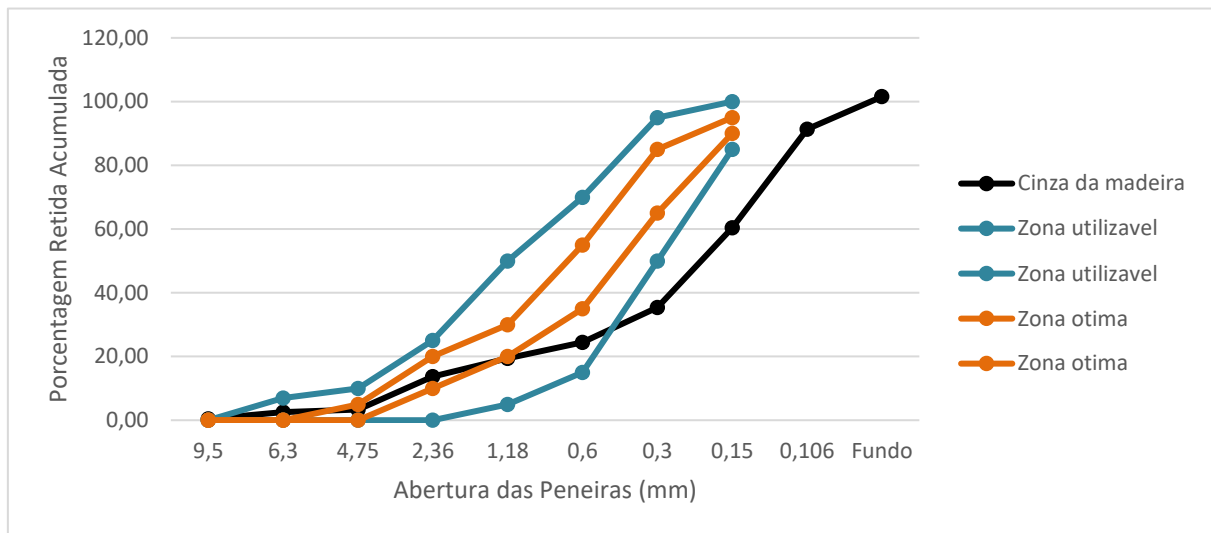
Material	Diâmetro máximo	Modulo de Finura
Areia Natural	6,3 mm	2,56

Fonte: Autor, 2018.

4.1.2 Cinza da madeira

Após ensaio de granulometria foi possível gerar o Gráfico 3. Enquadrando o material nas zonas ótima e utilizável conforme a norma ABNT NBR 7211 (2009), percebe-se que mais de 60% do material possui diâmetro inferior ao considerado utilizável. Com isso temos que esse material entrará mais com a função de filler na mistura de CCR.

Gráfico 3 - Curva granulométrica da cinza da madeira.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 6 apresenta algumas características físicas além da distribuição granulométrica, encontradas a partir do ensaio de granulometria.

Tabela 6 - Características físicas da cinza da madeira a partir da granulometria.

Material	Diâmetro máximo	Modulo de Finura
Cinza da madeira	9,5 mm	1,57

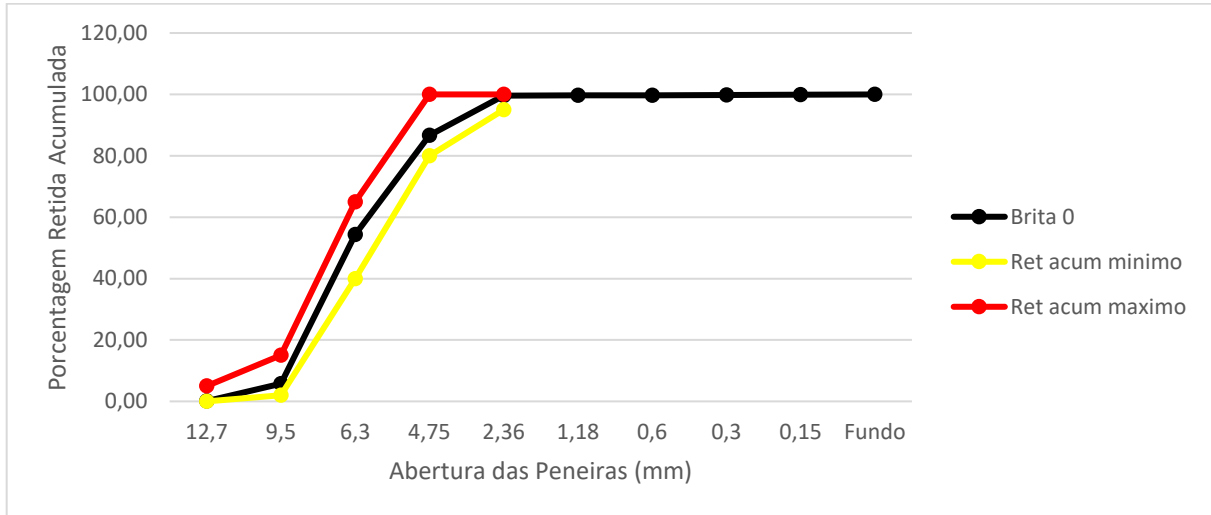
Fonte: Autor, 2018.

4.1.3 Brita 0

Com os dados retirados do ensaio de granulometria, produziu-se o Gráfico 4. De fato, se enquadra como brita 0 de acordo com a NBR 7211 (2009) e também conforme a DNER-EM 037/97 apresenta granulometria para ser utilizada em concreto de cimento, além de ser um material bem graduado – existe grãos ao longo de toda a faixa granulométrica – o que colabora

no empacotamento das partículas e proporciona melhor comportamento na resistência à compressão.

Gráfico 4 - Curva granulométrica da brita 0.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 7 apresenta algumas características físicas além da distribuição granulométrica, encontradas a partir do ensaio de granulometria.

Tabela 7 - Características físicas da brita 0 a partir da granulometria.

Material	Diâmetro máximo	Modulo de Finura
Brita 0	12,7 mm	5,91

Fonte: Autor, 2018.

4.2 MASSA ESPECIFICA DO MATERIAL

O valor de massa específica em (g/cm³) da areia após execução do ensaio conforme descrito em métodos, encontra-se na Tabela 8.

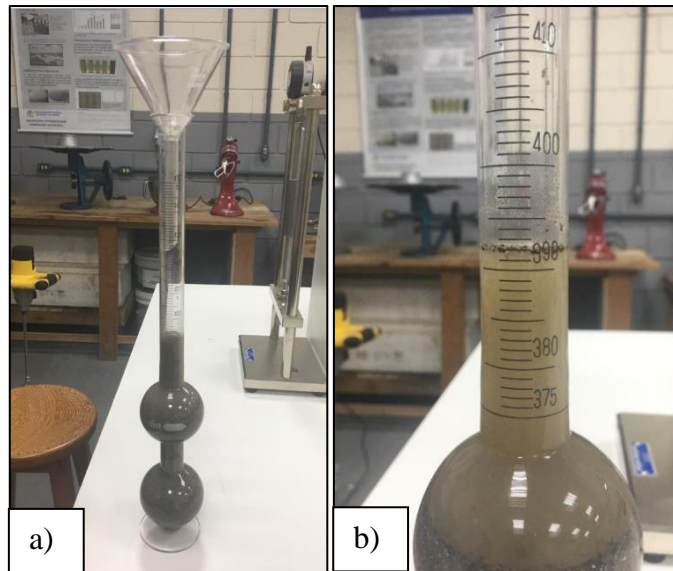
Tabela 8 - Massa específica da areia natural.

Material	Massa específica
Areia Natural	2,604

Fonte: Autor, 2018.

Resultado esse, obtido após a realização do ensaio com o vidro chapam e 500g do material seco, etapas expostas na Figura 13.

Figura 13 - a) Frasco Chapman com água e areia natural, b) Leitura realizada.



Fonte: Autor, 2018.

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

4.3.1 Absorção areia

O valor de absorção de água pela areia em porcentagem após execução do ensaio conforme descrito em métodos, encontra-se na Tabela 9.

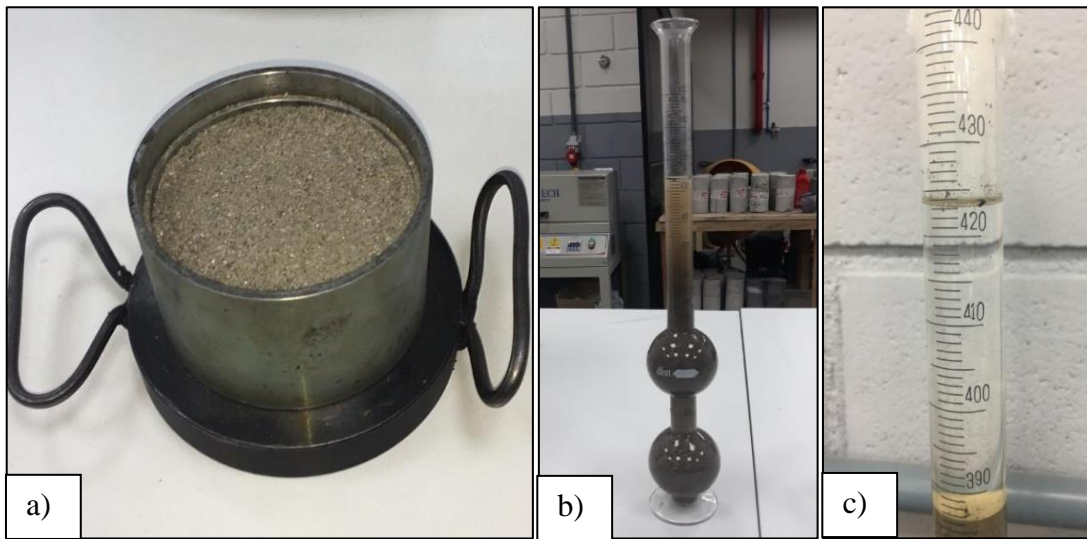
Tabela 9 - Absorção de água da areia natural.

Material	Absorção de água
Areia Natural	18,59%

Fonte: Autor, 2018.

Resultado esse, obtido após a realização do ensaio com o vidro chapam e o volume de material compactado e pesado, etapas expostas na Figura 14.

Figura 14 - Procedimento de ensaio: a) Molde com material compactado; b) Frasco Chapman com água e areia, c) Leitura após 5 dias de absorção.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.2 Absorção cinza da madeira

O valor de absorção de água pela areia em porcentagem após execução do ensaio conforme descrito em métodos, encontra-se na Tabela 10.

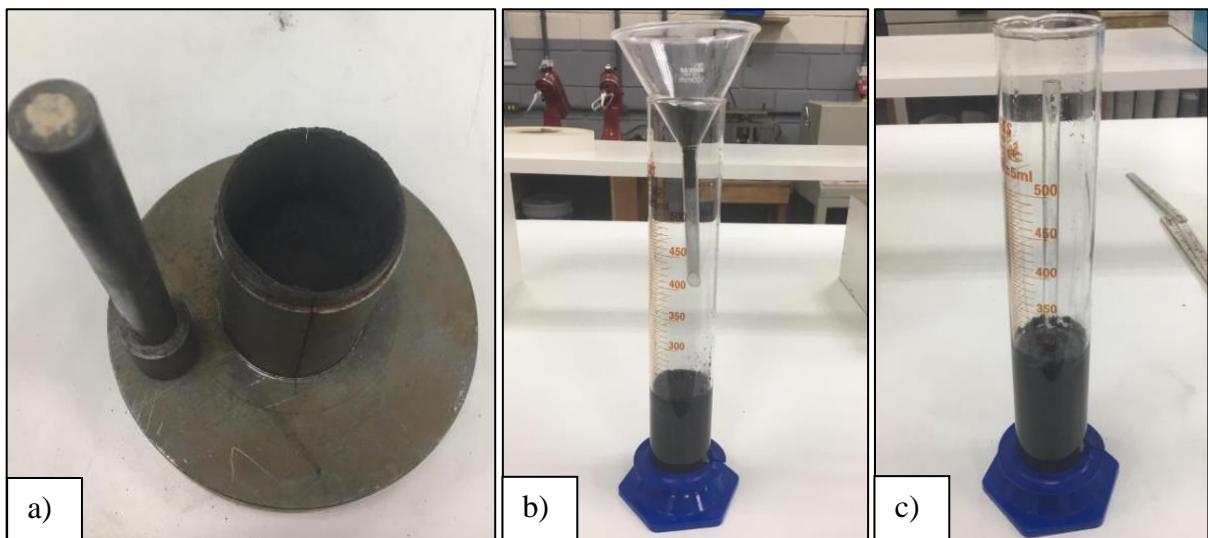
Tabela 10 - Absorção de água da cinza da madeira.

Material	Absorção de água
Cinza da madeira	32,1%

Fonte: Autor, 2018.

O ensaio realizado pelo autor deste trabalho mostrou absorção próxima ao encontrado por Bennack (2016), buscou-se quando utilizar esse resíduo, acrescentar 32,5% a mais de água na mistura, assim ficando com características físicas mais próximas ao do traço de referência. Resultado esse, obtido após a realização do ensaio com o recipiente medidor e o volume de material compactado e pesado, etapas expostas na Figura 15.

Figura 15 - a) Amostra compactada dentro do molde; b) Inserindo amostra pesada no recipiente e c) Mistura da água com a cinza da madeira.

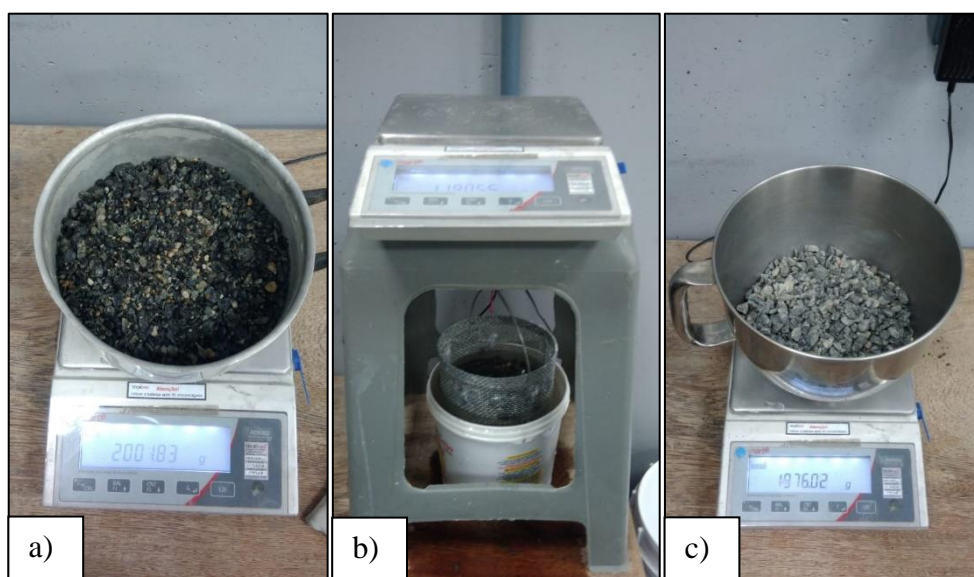


Fonte: Autor, 018.

4.4 ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA BRITA 0

As etapas do ensaio necessário para obter os valores de absorção e massa específica da brita 0, encontram-se expostas na Figura 16.

Figura 16 - Procedimento de ensaio: a) Peso agregado saturado com superfície seca; b) Peso agregado saturado e submerso; c) Peso após agregado seco em estufa.



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados obtidos após execução do ensaio conforme descrito em métodos, encontra-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Características físicas da brita 0.

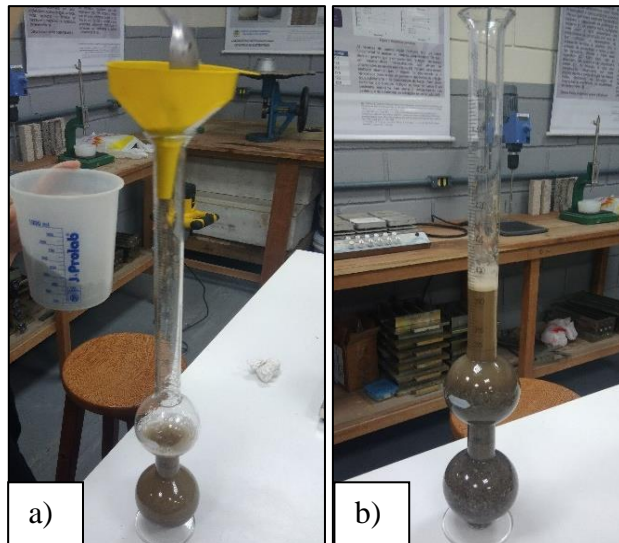
Material	Massa específica do agregado seco	Massa específica do agregado saturado com superfície seca	Absorção de água
Brita 0	2,435 g/cm ³	2,461	1,31%

Fonte: Autor, 2018.

4.5 TEOR DE UMIDADE AREIA

As etapas do ensaio necessário para obter o valor de teor de umidade da areia em porcentagem, encontram-se expostas na Figura 17.

Figura 17 - a) Introduzindo areia no frasco Chapman e b) Momento da leitura após 45s.



Fonte: Autor, 2018.

O resultado obtido após execução do ensaio conforme descrito em métodos, encontra-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Teor de umidade da areia.

Material	Teor de umidade
Areia Natural	3,97 %

Fonte: Autor, 2018.

4.6 DEFINIÇÃO DE DOSAGEM

A pesquisa tem como objetivo expor a possibilidade de empregar um resíduo produzido em larga escala dentro do país, em misturas de concretos. Pesquisas realizadas por Nienkotter (2018) já identificaram a dificuldade de utilizar substituições acima de 20%, pela quebra dos corpos-de-prova durante o desmolde, devido à aderência do concreto ao molde e a quebra do corpo-de-prova por esfrelamento. As proporções de massa utilizadas nas misturas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Dosagem dos materiais para cada traço.

Traço referência						
Cimento	Cinza da madeira	Areia	Brita 0	Água	Total	Unid
1	0	7	7	0,975	15,975	kg
6,26	0	43,82	43,82	6,10	100,00	%
4,25	0	29,73	29,73	4,14	67,86	kg
Traço substituindo 10% da areia por cinza da madeira						
Cimento	Cinza da madeira	Areia	Brita 0	Água	Total	Unid
1	0,7	6,3	7	0,990	15,98	kg
6,26	4,38	39,44	43,82	6,20	100,09	%
4,25	2,97	26,76	29,73	4,204	67,92	kg
Traço substituindo 15% de areia por cinza da madeira						
Cimento	Cinza da madeira	Areia	Brita 0	Água	Total	Unid
1	1,05	5,95	7	0,997	15,975	kg
6,26	6,57	37,25	43,82	6,24	100,14	%
4,25	4,46	25,27	29,73	4,24	67,95	kg

Fonte: Autor, 2018.

Lembrando que foi considerado a absorção da cinza para cálculo do traço, quando presente na mistura. Substituição 10% da areia, tem-se uma porção de 0,7 kg de cinza, com absorção em torno de 32,5% exige-se um acréscimo de 0,015 kg de água na mistura. O mesmo raciocínio seguiu quando substituído 15% de cinza na mistura.

4.7 CORPOS-DE-PROVA

Esse trabalho buscou substituir a cinza da madeira nas porções de 10% e 15% da areia natural. Após cálculo das dosagens foram feitas as misturas em betoneira no laboratório da UFSC. Na Figura 18, exposto o processo de execução dos corpos-de-prova.

Figura 18 - Moldagem dos corpos-de-prova.



Fonte: Autor, 2018.

Após a moldagem dos CPs, necessário curar nas primeiras 24h sob lona úmida, desmolda-los e então coloca-los imersos em água até o momento de realizar os ensaios, Figura 19.

Figura 19 - a) Cura primeiras 24h; b) CPs logo após desmolde e c) Cura final em imersão.



Fonte: Autor, 2018.

Na figura 20, estão os corpos de prova após cura de 7 dias em imersão, retirados somente algumas horas antes do ensaio de compressão axial. Os corpos-de-prova com 15% de

cinza apresentaram dificuldade no desmolde, pela aderência do concreto às paredes do molde, gerando elevada quantidade de farelos, porém sem quebras.

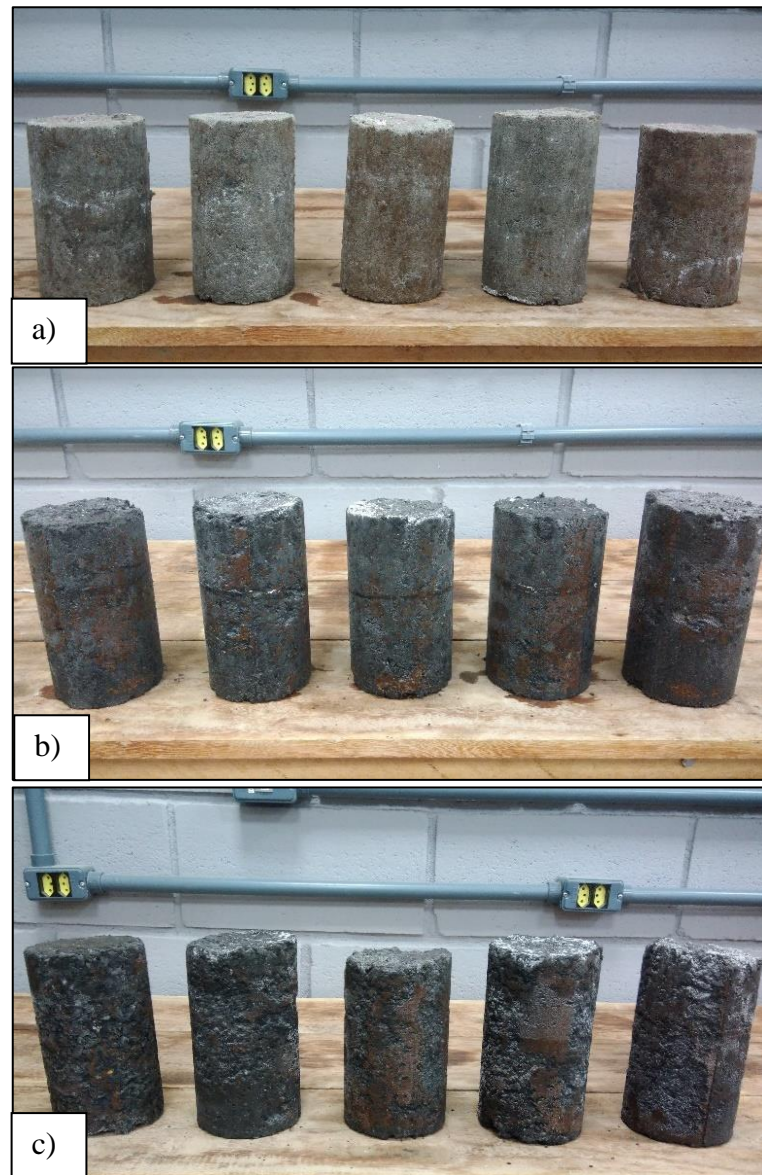
Figura 20 - Corpos-de-prova de CCR aos 7 dias de cura: a) Traço referencia; b) 10% de cinzas e c) 15% de cinzas.



Fonte: Autor, 2018.

Na Figura 21, apresentam-se os corpos-de-prova aos 28 dias de cura em imersão. Visualmente apresentaram mais semelhança de coloração entre si, fato que aos 7 dias a diferença de tonalidade era perceptível.

Figura 21 - Corpos-de-prova de CCR aos 28 dias de cura: a) Traço referencia; b) 10% de cinzas e c) 15% de cinzas.



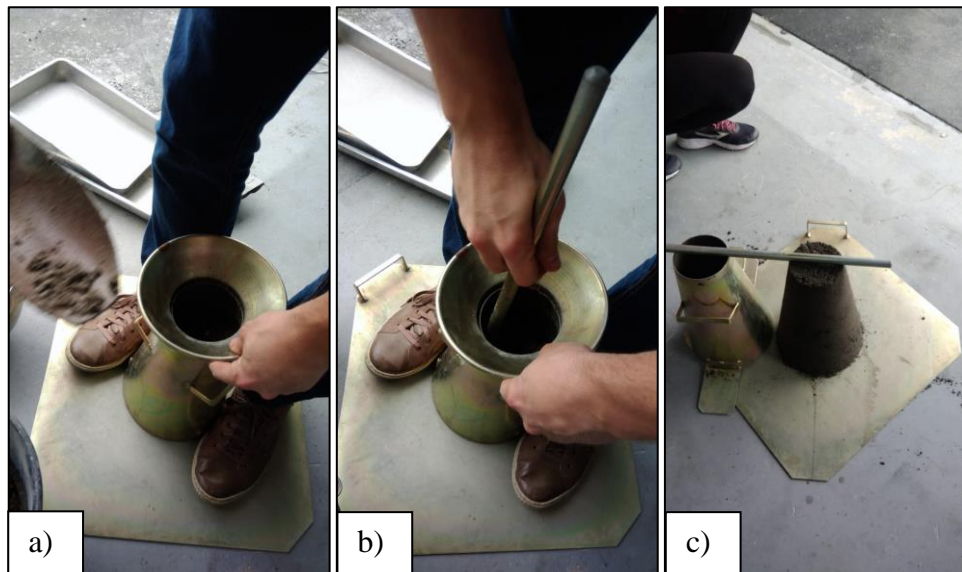
Fonte: Autor, 2018.

4.6 CONSISTÊNCIA

Para todos os traços obteve-se abatimento zero, uma característica fundamental para esse tipo de concreto, conforme já apontado por Mehta e Monteiro (2008), uma consistência seca o suficiente para ser possível o suporte do rolo vibratório.

O processo do ensaio foi registrado para a mistura de traço com 10% de cinza, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - a) Preenchimento do cone; b) Aplicação dos 25 golpes por camada e c) Abatimento da mistura.



Fonte: Autor, 2018.

4.8 ENSAIO DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Ao todo foram ensaiados 4 corpos-de-prova de cada mistura, cujos valores se encontram listados na Tabela 14.

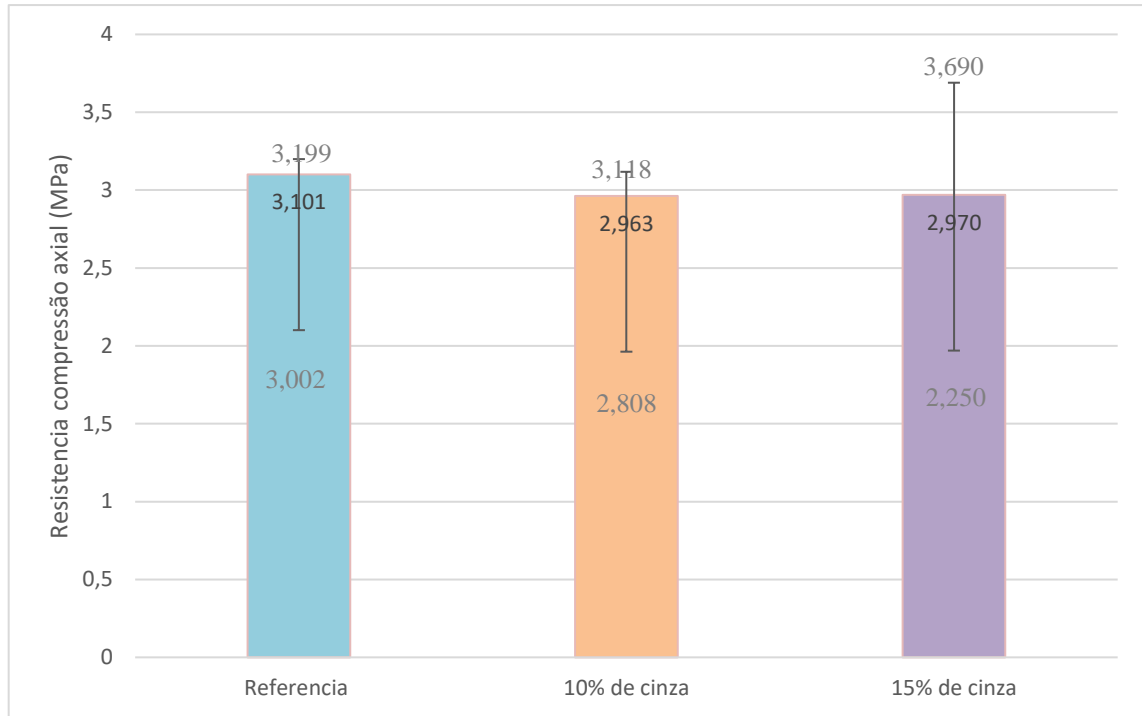
Tabela 14 - Resistência à compressão axial para cada CP aos 7 dias.

Corpo de Prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)
Referencia	3,031	3,246	3,052	3,075	3,101
10% de cinza	3,114	2,905	2,772	3,06	2,963
15% de cinza	3,046	2,426	3,258	3,149	2,970

Fonte: Autor, 2018.

E para melhor visualização desses resultados, encontra-se exposto em seguida o Gráfico 5, com os valores para o traço referência, com 10% e 15% de cinza da madeira.

Gráfico 5 - Média das resistências à compressão simples aos 7 dias.



Fonte: Autor, 2018.

A resistência média obtida para os corpos-de-prova do traço referência aos 7 dias e rompidos à compressão simples foi de 3,101 MPa \pm 0,1 MPa. Os intervalos presentes em cada coluna representam o desvio padrão das amostras de cada mistura. Comparando as colunas, percebe-se uma pequena diminuição da resistência ao ser substituído 10 e 15% da areia natural por cinza da madeira. A resistência média dos CPs, quando incorporado cinza, apresentam valores muito próximo aos CPs de referência, porém os seus desvios padrões são mais significativos. O fato da mistura ser muito seca e de difícil mistura por completo dos materiais, principalmente na presença de cinza, que com alto teor de finos forma maiores grumos durante a mistura, é possível que seja um dos motivos para os resultados encontrados.

Aos 28 dias foram realizados os mesmos ensaios e cálculos para encontrar as resistências obtidas, abaixo, tem-se a Tabela 15 com os resultados.

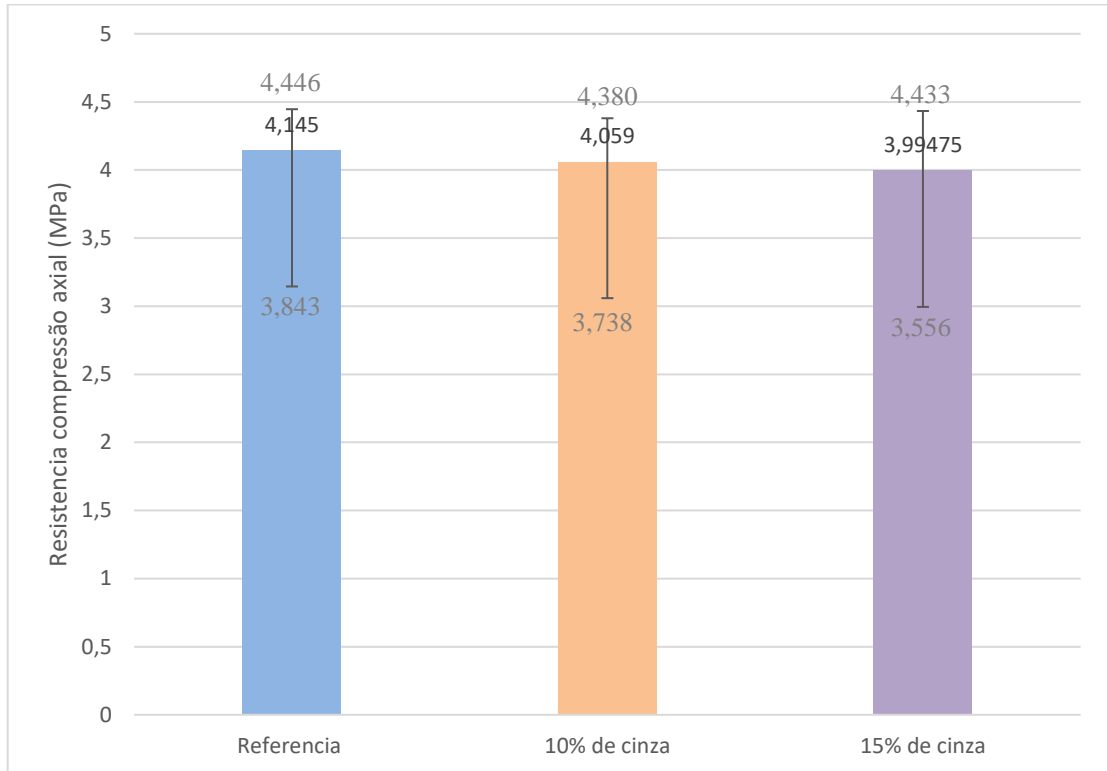
Tabela 15 - Resistências à compressão axial para cada CP aos 28 dias.

Corpo de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)
Referencia	4,58	4,095	3,895	4,01	4,145
10% de cinza	4,43	3,737	4,217	3,852	4,059
15% de cinza	3,674	3,824	3,838	4,643	3,994

Fonte: Autor, 2018.

Para melhor visualização dos resultados, apresenta-se o Gráfico 6.

Gráfico 6 - Média das resistências à compressão simples aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2018.

A resistência média obtida para os corpo-de-prova do traço referência, aos 28 dias, chegou a 4,145MPa \pm 0,301 MPa. Nesse gráfico também foi representado os desvios padrões sobre cada coluna respectivamente as misturas. Aos 28 dias, como verificou aos 7 dias, ocorre uma pequena diminuição da resistência aos substituir 10 e 15% da areia, porém os desvios padrões ficaram com valores mais próximos.

4.9 ENSAIO DE RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A norma NBR 6118 (2004) permite correlacionar os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral para encontrar a resistência à tração do material. A resistência à tração direta pode ser considerada igual a 0,9 da resistência por compressão diametral. Gerando uma pequena diminuição nas resistências medias verificadas aos 28 dias, apontadas na Tabela 16.

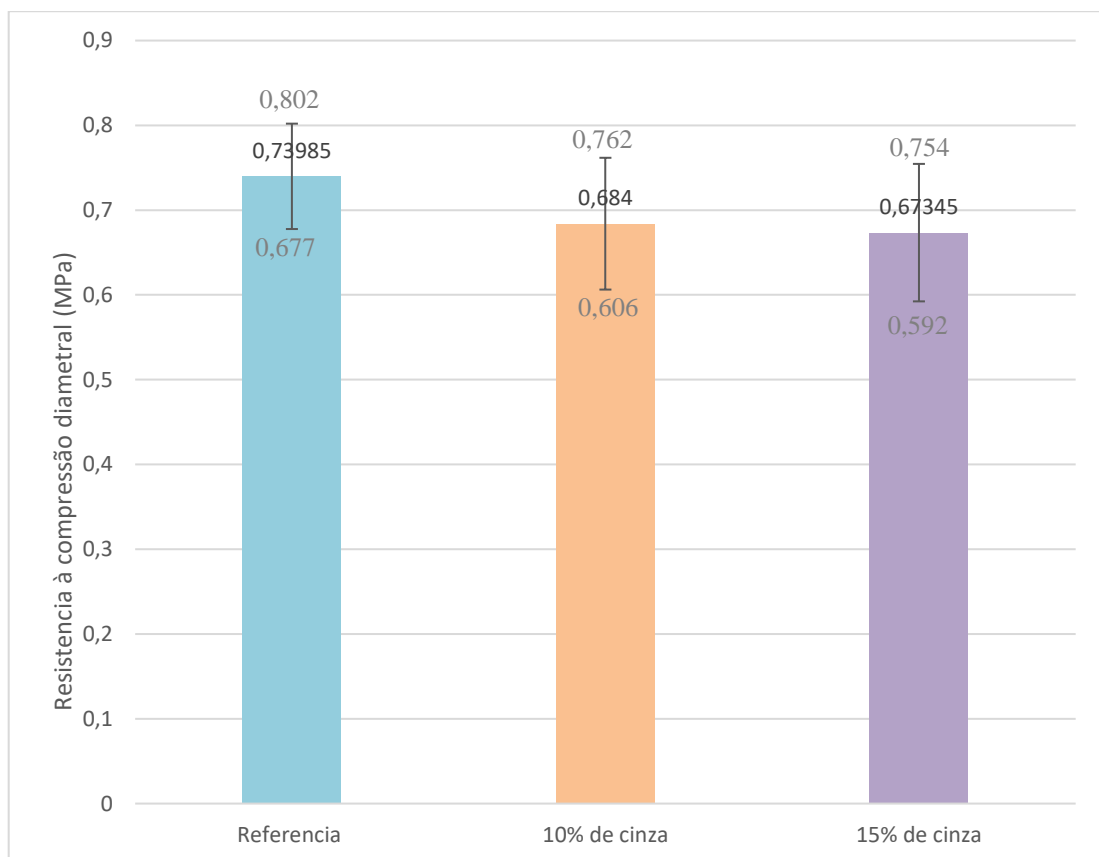
Tabela 16 - Resistências à compressão diametral para cada CP aos 28 dias relacionando com resistência à tração.

Corpos de prova	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Compressão Média (MPa)	Tração Média (MPa)
Referencia	0,6468	0,7829	0,7751	0,7528	0,73985	0,6658
10% de cinza	0,674	0,7806	0,6904	0,591	0,684	0,6156
15% de cinza	0,6867	0,7804	0,6343	0,5924	0,67345	0,6061

Fonte: Autor, 2018.

Com os valores para compressão diametral elaborou-se o Gráfico 7.

Gráfico 7 - Média de resistências à compressão diametral aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2018.

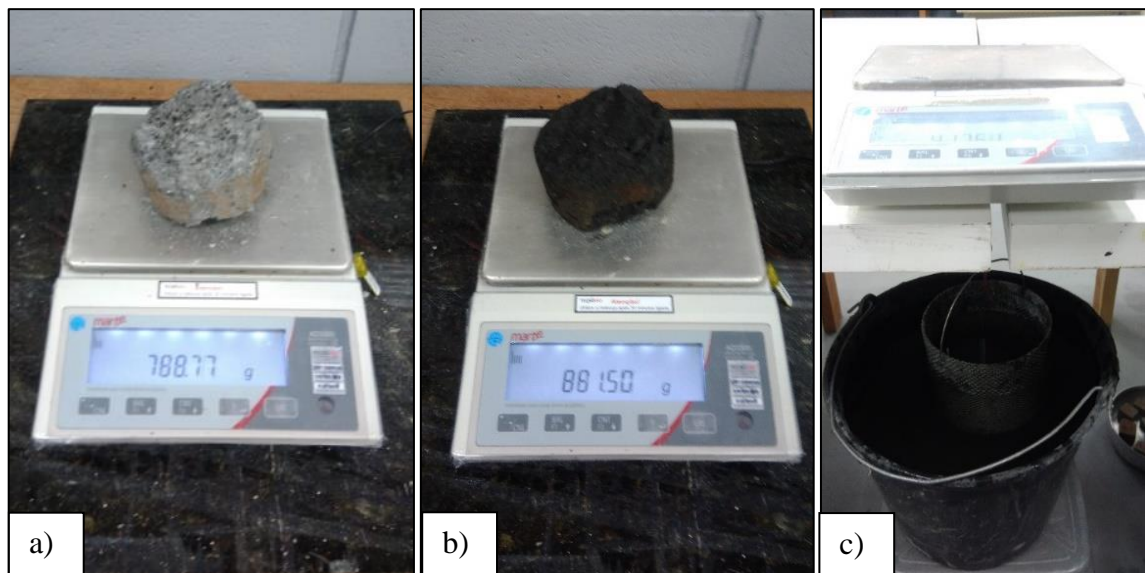
A resistência média obtida na compressão diametral para o traço referência foi de 0,74 MPa \pm 0,06MPa, passando para resistência a tração 0,666 MPa \pm 0,54 MPa. Ocorre um leve decréscimo nas resistências ao aumentar a quantidade de cinza, comportamento que já se repetiu no ensaio de compressão simples. Em cada coluna se encontra representado os desvios padrões, que amplia conforme o acréscimo de cinza, as diferentes resistências atingidas apesar de serem

de um mesmo traço acredita-se ser pelo fato da mistura no momento da execução ser muito seca e de difícil mistura.

4.10 DENSIDADE APARENTE, POROSIDADE ABERTA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para realização do ensaio, foram coletadas amostras de diferentes CPs para cada traço. As determinações do ensaio foram realizadas com pedaços dos CPs rompidos aos 28 dias, sendo cinco frações de Cps para cada traço. Abaixo encontra-se Figura 23 com as etapas do ensaio.

Figura 23 - Processo do ensaio Arquimedes para as frações dos CPs: a) Peso após seco em estufa; b) Peso saturado com superfície seca e c) Peso saturado e submerso.



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 17 aponta os valores obtidos nas pesagens das frações e os resultados dos cálculos realizados para absorção (A), Densidade aparente (D_{apar}) e Porosidade aberta (P_{aber}).

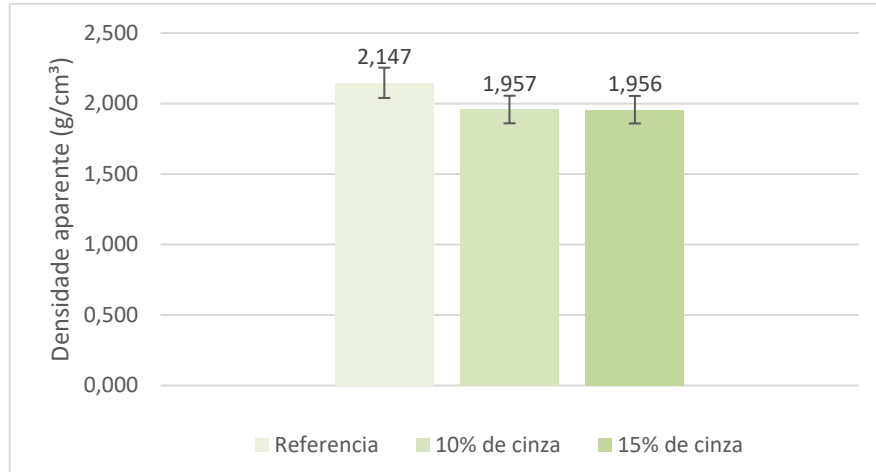
Tabela 17 - Média dos resultados referentes ao ensaio de Arquimedes para todos os CPs.

Traços	A (%)	D_{apar} (g/cm ³)	P_{aber} (%)
Referencias	8,032	2,147	17,133
10% de cinza	12,339	1,957	24,141
15% de cinza	12,653	1,956	24,718

Fonte: Autor, 2018.

A partir dos resultados expostos acima, foi gerado o Gráficos 8 para ilustrar e melhorar a compreensão dos dados.

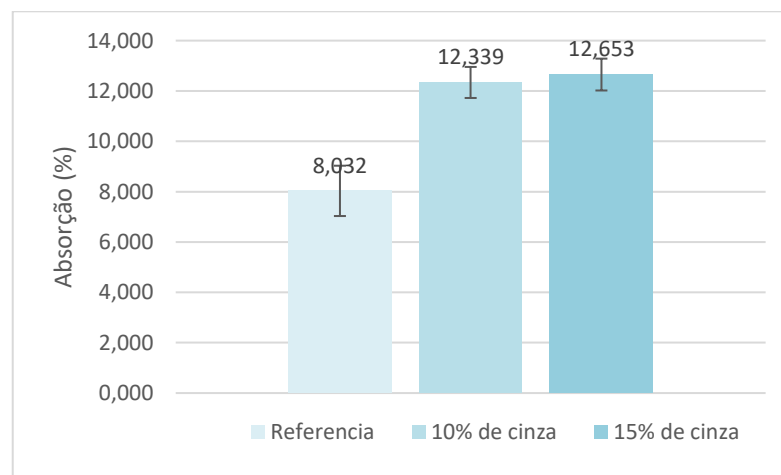
Gráfico 8 - Densidade aparente dos Corpos-de-prova.



Fonte: Autor, 2018.

Para o traço Referência a densidade foi de 2,147 g/cm³, ao se adicionar 10% de cinza ocorre uma redução de 8,85% e quando adicionado 15% de cinza essa redução permanece praticamente a mesma, na casa de 8,90%. Inclusive no gráfico é possível visualizar essa semelhança de comportamento entre os CPs mesmo com substituições diferentes de resíduos. Essa redução da densidade pode estar correlacionada com o aumento da absorção de água das misturas com a cinza, como apresenta-se no Gráfico 9.

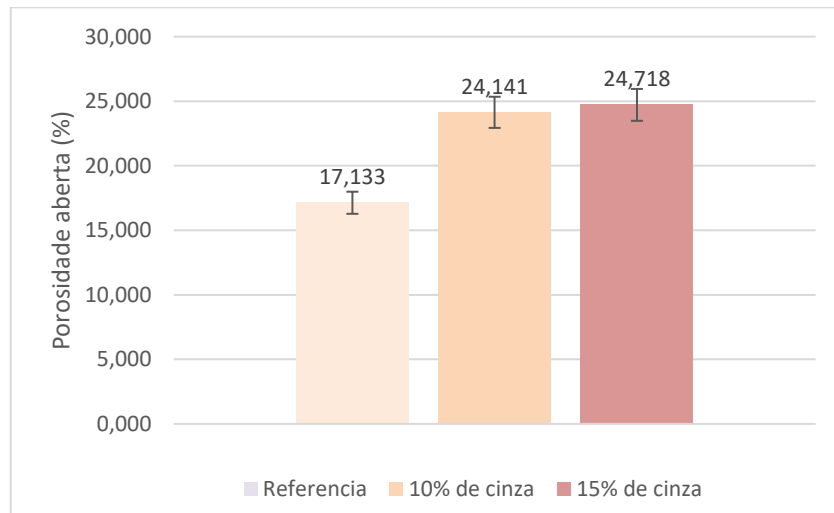
Gráfico 9 - Absorção de água dos Corpos-de-prova.



Fonte: Autor, 2018.

Como se esperava, os Cps com acréscimo de cinza, de fato, absorveram mais quantidade de água. Os CPs do traço referência absorveram 8,032%, porém os que continham cinza tiveram um acréscimo de 53,53% e 57,53%. Ao acrescentar 5% de cinza levou a um aumento de 7% de absorção, crescimentos proporcionais. Alta absorção de água já era esperado, pois como destacado anteriormente nesse trabalho, a cinza da madeira absorve água na porção de 32,5%, absorção essa que ocorre não somente durante a mistura e cura do concreto, mas também durante toda a vida útil. Analisando esses resultados em torno de 55% tem-se que 32,5% foi a cinza que absorveu de água e o restante foram retidos em poros da estrutura. Corroborando com isso tem-se os resultados do ensaio de porosidade apresentados no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Porosidade aberta dos Corpos-de-prova.



Fonte: Autor, 2018.

De fato, os CPs com presença de cinza da madeira obtiveram maior percentual de porosidade aberta quando comparado aos de referência, os CPs tiveram um acréscimo de 40,903% para os com 10% de cinza e 44,27% para os com 15% de cinza, novamente apresentam um crescimento proporcional com a quantidade adicionada. A elevada absorção de água do resíduo colaborou para este fato, pois como as partículas durante a execução e a cura dos CPs permanecem absorvendo água, gera vazios no concreto endurecido.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando valores de massa específica entre os materiais são próximos, foi possível realizar a substituição do agregado miúdo pela cinza, não interferindo na massa específica da mistura. Como o módulo de finura das cinzas é menor do que da areia, atuaram como filler, realizando maior distribuições dos vazios. Porém como a absorção das cinzas gera um índice de vazios maior, a resistência tende a diminuir.

A diminuição de resistência já era esperada como previsto por Udoeyo (2006) e Bardini (2008). A queda de resistência está relacionada com o aumento de porosidade e consequentemente diminuição da densidade dos corpos-de-prova. Isto acontece, devido a elevada capacidade da cinza absorver água (13% a mais comparado a areia) gerando vazios na estrutura e falta de água para reação química com o cimento.

As quedas de resistências apresentaram diferenças inferiores a 5% quando comparado ao de traço referência, mostrando que independe da quantia adicionada de cinza (10% ou 15%). Apesar de não atender a norma DNIT 056 (2013) que exige resistência mínima de 5 MPa aos 7 dias, percebe-se viabilidade de seu uso devido a resultados semelhantes encontrados. Os resultados apresentados indicam que a readequação de volume de água, permitindo melhor hidratação, possibilitará alcançar maiores resistências.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Estudos com novas faixas de substituição da areia por cinza da madeira.
- Estudo de dosagem semelhante a apresentada, porém com maiores níveis de água, garantido boa reação química do cimento.
- Realização dos corpos de prova com compactação mecânica, para avaliação comparativa da frequência de energia de compactação colaborando para diminuição de vazios.

REFERÊNCIAS

- _____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - **DNIT 056/2013 – ES:** Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **DNER-EM 037/97:** Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **DNER-ME 046/98:** Concreto – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **DNER-ME 194/98:** Agregado – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **DNIT.** Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 059/2004-ES:** Pavimento Rígido – Pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo – Especificações de serviço — Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10004/2004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006/2004:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007/2004:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 11578/1991:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5736/1991:** Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5738/2015:** Concreto – Procedimento para Moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739/2007:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 6118/2004:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 7211/2009:** Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7211/2009:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36256/nbr7211-agregado-para-concreto-especificacao>> Acesso em: 11 nov. 2018. Acesso prévio gratuito.
- _____. **NBR 7222/2011:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36322/nbr7222-concreto-e-argamassa-determinacao-da-resistencia-a-tracao-por-compressao-diametral-de-corpos-de-prova-cilindricos>> Acesso em: 11 nov. 2018. Acesso prévio gratuito.

_____. **NBR 9775/2012:** Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36400/nbr9775-agregado-miudo-determinacao-do-teor-de-umidade-superficial-por-meio-do-frasco-de-chapman-metodo-de-ensaio>> Acesso em: 11 nov. 2018. Acesso prévio gratuito.

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

_____. **NBR NM 53/2003:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____. **Utilização de resíduos da produção de celulose.** n. 77. nov. 2003. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=460&subject=E>. Acesso em: 24 abr. 2018.

AEC. Arquitetura, Engenharia e Construção. **Cimento: diferentes tipos e aplicações.** Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes_11959_0_1> Acesso em 26 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** São Paulo. 2013. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

BARDINI, V. S. S. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica.** 2008. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

BENNACK, V. **Análise da Viabilidade Técnica da Reutilização da Cinza da Madeira em Produtos Cimentícios.** 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado - Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 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**, p. 669-685. Malaysia, 2011.

CODIGO DE TRANSITO BRASILEIRO. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/19503.htm>. Acesso em: 26 mai. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias.** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/conheca-principais-defeitos-pavimento>> Acesso em: 25 abr. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Por que os pavimentos das rodovias não duram?** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/Noticia/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais.** São Paulo: IBRACON, 2005. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/18627390/cap8---adicoes-minerais>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Nomenclatura das rodovias federais.** 2017. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/rodovias-federais/nomeclatura-das-rodovias-federais>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

FONSECA, G. C. **Adições Minerais e as Disposições Normativas Relativas à Produção de concreto no Brasil:** Uma abordagem Epistêmica. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado - Materiais de Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV.** 2007. 294 f. Tese (Doutorado - Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Earth Overshoot day.** Disponível em: <<https://www.footprintnetwork.org/>> Acesso em: 03 ago. 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n. 72, p. 6-15. São Paulo. 2007. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13564/15382>>. Acesso em: 01 jun.2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais.** Disponível em: <http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_residuos_solidos_industriais.pdf> Acesso: 19 de jun. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto:** Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. Isbn.: 978-85-98576121: Ibracon, São Paulo, 2008. 674 p.

MESQUITA, J. C. L. **Pavimento Rígido como Alternativa Econômica para Pavimentação Rodoviária:** Estudo de caso - Rodovia BR-262, Miranda - Morro do Azeite - MS. 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MORAES, M. **Adições Minerais ao Concreto – Materiais de Construção II**. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17310/material/08.%20Adi%C3%A7%C3%B5es%20Minerais%20para%20Concretos.pdf>> Acesso em: 19 jun. 2018.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

NIENKOTTER, Y. **Adição de cinza da madeira em concreto compactado com rolo como sub-base de pavimento rígido**. 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. **Relatório Brundtland: Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: FGV, 1988. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/12906958/Relatorio-Brundtland-Nosso-Futuro-Comum-Em-Portugues>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

REVISTA DA MADEIRA. **Madeira de reflorestamento para móveis**. n.77. nov. 2004.

Disponível em:

<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=463&subject=M%F3veis%20e%20Tecnologia&title=Madeira%20de%20reflorestamento%20para%20m%F3veis>.

Acesso em: 24 abr. 2018.

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

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. **Acórdão nº 328/2013**. Plenário. Processo nº TC-030.410/2012-6. Ata nº 6/2013. Brasília, DF, Sessão de 27 de fevereiro de 2013.

TRICHÊS, G. e SILVA, A. J. **Estudo de viabilidade técnica de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo para aplicação em camadas de base de pavimentos compostos**. 36º Reunião anual de pavimentação. Curitiba, 2005.

UDOEYO, F. et al. Potential of wood waste ash as an additive in concrete. **Journal of materials in civil engineering**, p. 605-611, 2006.

WINCKLER, J. R. **Caracterização física e química de cinza de pinus spp. para a adição em produtos de cimento Portland: Concreto e Argamassa**. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, 2015.