

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

LEANDRO PELLIZZARO MARQUES

AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO (CCR) COM ADIÇÃO DE CINZA DE MADEIRA

Joinville

2018

LEANDRO PELLIZZARO MARQUES

AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO (CCR) COM ADIÇÃO DE CINZA DE MADEIRA

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. Valeria Bennack.

Joinville

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e inúmeras bênçãos que tem me dado ao longo de minha jornada.

A esta universidade, que durante esses últimos anos foi minha segunda casa. A todo corpo docente, direção e administração do campus que trabalharam arduamente para que nós, os alunos, tivéssemos a melhor formação possível.

A minha orientadora Me. Valéria Bennack, por todo conhecimento, excepcional paciência e confiança transmitida em todos os momentos do desenvolvimento deste trabalho, sem sua orientação esta pesquisa não seria possível.

Aos meus companheiros de curso, que me acompanharam neste percurso penoso que é a graduação, a parceria e companheirismo de vocês tornou esse processo muito mais fácil e prazeroso.

A todos os meus amigos, que sempre me deram forças e apoio.

Aos colegas de laboratório que me apoiaram na execução dos ensaios, em particular ao Gustavo Ramos que se mostrou sempre disponível.

Aos meus familiares, em especial meus pais e minha irmã, por todo amor, suporte, paciência e incentivo durante todos estes anos.

Por fim, agradeço a todos que mesmo não citados torceram por mim, acreditaram em mim e de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Todas as conquistas começam com o simples  
ato de acreditar que elas são possíveis.”*

## RESUMO

O crescente carregamento imposto pelo tráfego, somado a falta de investimento público tem levado a uma degradação precoce dos pavimentos brasileiros. Uma das formas de melhorar este cenário é a utilização de bases e/ou sub-bases rígidas, visto que as camadas puramente granulares, de forma geral, não se mostram mais compatíveis frente à demanda do tráfego. Paralelamente, nota-se uma crescente preocupação ambiental onde, diversas pesquisas são realizadas a fim de incorporar os subprodutos originados das indústrias em materiais de construção. Neste trabalho foram estudados os efeitos da incorporação da cinza de madeira, provenientes da combustão incompleta da madeira do Pinus, ao Concreto Compactado com Rolo (CCR). Foram produzidas três formulações, substituindo-se o agregado miúdo por cinza de madeira nas proporções de 0%, 5% e 10%, submetidas a ensaios de consistência no estado fresco e compressão axial, densidade aparente e absorção de água no estado endurecido. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento no teor de cinzas eleva a porosidade aberta e absorção de água do CCR enquanto, paralelamente, diminui a densidade aparente. Quanto à resistência à compressão, observou-se um aumento de 12,36% e um decréscimo de 0,55% de resistência das formulações com 5% e 10% de cinzas, respectivamente, em relação à referência aos 28 dias. Os valores de resistência validaram, segundo a norma, a utilização do material como camada de sub-base de um pavimento rodoviário.

**Palavras-chave:** Concreto Compactado com Rolo. Sub-base de pavimentos. Dosagem. Cinza de Madeira.

## ABSTRACT

The loading increase imposed by the traffic, summed up with the lack of public investment leads to a precocious degradation of the pavement. One of the ways to improve this scenario would be the use of rigid base and/or sub-base, since the purely granular layers are no longer compatible with the traffic demand. At the same time, due growing environmental concern, several researches were made in order to incorporate the by-products originated from the industries into construction materials. In this work, the effects of the incorporation of wood ash, originated from the incomplete combustion of the Pinus wood, into the Roller Compacted Concrete were studied. Three different formulations were produced, replacing the fine aggregate by wood ash in the proportions of 0%, 5% and 10%, and then submitted to tests of consistency in the fresh state and axial compression, apparent density and water absorption in the hardened state. The results show that the increase in the ash content raises the porosity and water absorption of the roller compacted concrete, while, at the same time, the bulk density. As for the compressive strength, there was an increase of 12,36% and a decrease of 0,55% of the compressive strength of the formulations with 5% and 10% of wood ash, respectively, in relation to the reference at 28 days. The values of resistance obtained validated, according to the norm, the use of the material as sub-base layer of a road pavement.

**Key-words:** Roller-Compacted Concrete, Sub-base of pavements, Dosing, Wood Ash.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal da estrutura de um pavimento flexível. ....	15
Figura 2 - Resposta mecânica de pavimento flexível: pressões concentradas. ....	16
Figura 3 - Estrutura semirrígida tradicional.....	16
Figura 4 - Seção transversal da estrutura de um pavimento rígido. ....	18
Figura 5 - Resposta mecânica de pavimento rígido. ....	19
Figura 6 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos. ....	35
Figura 7 - Etapas para execução do trabalho.....	41
Figura 8 - Agregados graúdos utilizados na mistura; Brita 0 (a); Brita 1 (b).....	44
Figura 9 - Agregado miúdo utilizado na mistura. ....	44
Figura 10 - Cinza de madeira utilizada na mistura. ....	45
Figura 11 - Conjunto de peneiras utilizadas; Cinza de Madeira (a); Brita 0 e Areia (b); Brita 1 (c).....	47
Figura 12 - Frasco de Chapman.....	48
Figura 13 - Betoneira utilizada na confecção dos CP.....	56
Figura 14 - Equipamentos utilizados no ensaio de consistência. ....	57
Figura 15 – Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão simples. ....	58
Figura 16 - Pesagem do agregado saturado com superfície seca (a); Pesagem do agregado em água (b); Pesagem do agregado seco em estufa (c). ....	61
Figura 17 - Frasco com 200 cm <sup>3</sup> de água (a); Preenchimento do frasco com agregado miúdo (b). ....	63
Figura 18 - Preenchimento do molde prismático (a); Frasco de Chapman em repouso para absorção de água (b). ....	63
Figura 19 – Colocação dos agregados graúdos (a); Colocação do cimento (b); Colocação do agregado miúdo e cinza de madeira (c). ....	71
Figura 20 - Moldagem dos CP.....	72
Figura 21 - Cura em tanque com água saturada em cal (a); CP retificados (b). ....	73
Figura 22 - Abatimento da formulação CCR 10 – C. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que afetam as propriedades do CCR.....	24
Tabela 2 - Diferenças entre pavimentos de CCP e CCR. ....	26
Tabela 3 - Composição química de cinzas de madeira.....	39
Tabela 4 - Caracterização do cimento.....	43
Tabela 5 - Análise Química da cinza de madeira. ....	45
Tabela 6 – Umidade ótima obtida pelos autores. ....	54
Tabela 7 - Fatores de correção para resistência à compressão.....	59
Tabela 8 - Caracterização dos agregados graúdos.....	61
Tabela 9 - Caracterização dos agregados miúdos.....	64
Tabela 10 - Caracterização da cinza de madeira. ....	66
Tabela 11 - Composição granulométrica das misturas de CCR.....	69
Tabela 12 - Traço das composições de CCR propostas. ....	71
Tabela 13 - Módulo de finura das composições granulométricas.....	83
Tabela 14 - Evolução esperada da Resistência à Compressão.....	85



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Crescimento do uso do CCR nos EUA. ....	21
Gráfico 2 - Resistência x Densidade para diversas misturas de CCR.....	27
Gráfico 3 - Curva de Compactação de CCR com consumo de cimento de 90 kg/m <sup>3</sup> . .....	33
Gráfico 4 - Faixa granulométrica de Pittman e Ragan.....	52
Gráfico 5 - Curvas de compactação. ....	53
Gráfico 6 - Teor de cimento versus resistência a compressão.....	54
Gráfico 7 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos. ....	60
Gráfico 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	62
Gráfico 9 - Curva granulométrica da cinza de madeira. ....	64
Gráfico 10 - Composição granulométrica do agregado miúdo com 5% de cinza de madeira. ....	65
Gráfico 11 - Composição granulométrica do agregado miúdo com 10% de cinza de madeira. ....	65
Gráfico 12 - Granulometria dos materiais utilizados na pesquisa.....	66
Gráfico 13 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR – RF.....	67
Gráfico 14 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR - 5C.....	68
Gráfico 15 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR - 10C.....	68
Gráfico 16 - Faixa granulométrica de Harrington <i>et al.</i> (2010).....	69
Gráfico 17 - Densidade aparente das formulações. ....	74
Gráfico 18 - Densidade aparente para diversas pesquisas. ....	75
Gráfico 19 - Absorção de água das formulações. ....	76
Gráfico 20 - Absorção de água para diversas pesquisas. ....	77
Gráfico 21 – Porosidade aberta das formulações. ....	77
Gráfico 22 - Porosidade aberta para diversas pesquisas.....	78
Gráfico 23 - Resistência à compressão axial das misturas. ....	79
Gráfico 24 - Resistência à compressão de diversas pesquisas. ....	81
Gráfico 25 – Curva granulométrica da presente pesquisa comparada com as formulações de granulometria fina, média e grossa dos estudo de Trichês (1993). .	82
Gráfico 26 – Curva granulométrica da presente pesquisa comparada com Silva (2006) e Ricci (2007). ....	83

Gráfico 27 - Resistência à compressão x idade. ....	85
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CCR – Concreto compactado com rolo

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Km – Quilômetro

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CCP – Concreto de Cimento Portland

EUA – Estados Unidos da América

NBR – Norma Brasileira

mm – Milímetros

m - Metros

MPa – Megapascal

kg – Quilograma

m<sup>3</sup> - Metro Cúbico

BGTC – Brita graduada tratada com cimento

g – Gramas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

DMC – Diâmetro máximo característico

CCR – RF – Formulação do CCR de referência

CCR – 5C – Formulação do CCR com 5% de adição de cinza de madeira

CCR – 10C – Formulação do CCR com 10% de adição de cinza de madeira

CP – Corpos de prova

h/d – Altura/diâmetro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
1.2	METODOLOGIA .....	12
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	CONCEITOS GERAIS DE PAVIMENTAÇÃO .....	14
2.1.1	<b>Pavimento Flexível .....</b>	<b>14</b>
2.1.2	<b>Pavimento Semirrígido.....</b>	<b>16</b>
2.1.3	<b>Pavimento Rígido .....</b>	<b>17</b>
2.2	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) .....	20
2.2.1	<b>Histórico .....</b>	<b>20</b>
2.2.2	<b>Características.....</b>	<b>22</b>
2.2.3	<b>Vantagens e benefícios do uso CCR como camada de pavimento rodoviário.....</b>	<b>27</b>
2.2.4	<b>Limitações do CCR.....</b>	<b>29</b>
2.2.5	<b>Metodologia de dosagem do CCR.....</b>	<b>30</b>
2.3	IMPACTOS AMBIENTAIS .....	33
2.4	ADIÇÃO DE MINERAIS.....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	41
3.2	MATERIAIS .....	42
3.2.1	<b>Água.....</b>	<b>42</b>
3.2.2	<b>Cimento .....</b>	<b>42</b>

<b>3.2.3</b>	<b>Agregado Graúdo</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Agregado Miúdo</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Cinza de Madeira</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Caracterização das matérias primas</b> .....	<b>46</b>
3.3.1.1	Distribuição granulométrica .....	46
3.3.1.2	Massa específica e absorção de água do agregado miúdo.....	48
3.3.1.3	Massa específica e absorção de água do agregado graúdo .....	50
<b>3.3.2</b>	<b>Dosagem do CCR</b> .....	<b>51</b>
3.3.2.1	Definição da composição granulométrica das misturas.....	51
3.3.2.2	Determinação da umidade ótima .....	53
3.3.2.3	Dosagem das misturas .....	54
3.3.2.4	Moldagem dos corpos de prova .....	55
<b>3.3.3</b>	<b>Comportamento Mecânico do CCR</b> .....	<b>56</b>
3.3.3.1	Ensaio no estado fresco .....	57
3.3.3.1.1	<i>Consistência</i> .....	57
3.3.3.2	Ensaio no estado endurecido .....	57
3.3.3.2.1	<i>Ensaio de resistência à compressão simples</i> .....	57
3.3.3.2.2	<i>Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água</i> .....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Agregado Graúdo</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Agregado Miúdo</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Cinza de Madeira</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2</b>	<b>DOSAGEM DO CCR</b> .....	<b>66</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Definição da composição granulométrica das misturas</b> .....	<b>66</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Dosagem das misturas</b> .....	<b>70</b>

<b>4.2.3</b>	<b>Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3</b>	<b>COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CCR.....</b>	<b>73</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Consistência .....</b>	<b>73</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Propriedades físicas: Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....</b>	<b>74</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>87</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário no Brasil é um setor de suma importância para o desenvolvimento econômico do país, visto que diversos setores da produção brasileira dependem dele para operar e desenvolver satisfatoriamente (RICCI, 2007). Contudo, a falta de investimento público somada à crescente demanda do tráfego, vem ocasionando a degradação precoce da malha rodoviária nacional.

Segundo o levantamento do Sistema Nacional de Viação, realizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a malha rodoviária do país tem cerca de 1.700.700 quilômetros (km), sendo desta apenas 12,4% pavimentada. Dentre as rodovias pavimentadas, segundo os dados da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2017), 50,9 % encontravam-se em situação regular, ruim ou péssima.

No período do milagre econômico brasileiro, sobretudo na região sul, a pavimentação de grandes extensões, associada a uma grande demanda de cimento pelos diversos setores da construção civil, fez consolidar-se no país a execução de bases e/ou sub-bases compostas exclusivamente por materiais granulares britados (SILVA, 2006).

Trichês e Silva (2005) apontam que frente ao crescente carregamento que vem sendo imposto pelo tráfego, este arranjo de camadas não tem atendido aos padrões mínimos desejados para estrutura do pavimento, muitas vezes apresentando uma vida útil menor que a projetada. Neste cenário, torna-se de suma importância o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias que resultem em estruturas de maior rigidez, de forma a mitigar as patologias precoces observadas nos pavimentos.

Uma das alternativas é a execução de pavimentos mais robustos, utilizando camadas de base e/ou sub-base tratadas com ligante hidráulico, ou mesmo, concreto compactado com rolo (CCR), que apresentam um melhor desempenho em relação à capacidade de suporte e propriedades elásticas da estrutura do pavimento (FEDRIGO *et al.*, 2014).

O CCR é composto basicamente como o concreto convencional, agregados, cimento, água e eventuais aditivos. A diferença é que o CCR é extremamente seco (*slump zero*), devido a uma composição com elevada quantidade de agregados miúdos e baixa quantidade de cimento e água, o que faz necessária a aplicação de

uma energia de compactação no processo de densificação do concreto (MEDDAH *et al.*, 2014).

Pavimentos concebidos com CCR se mostram resistentes, duráveis e mostram baixas deformações. Tais características combinadas com a velocidade de execução e economia, fazem do CCR uma excelente alternativa de base ou sub-base rígida, ou mesmo de revestimento para pavimentos rodoviários (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Outra característica relevante do CCR é a permissividade na composição de sua mistura, ou seja, a capacidade de adequar o uso de materiais não convencionais em sua dosagem (SILVA, 2006). Tendo isso em vista, a busca por materiais alternativos na dosagem do CCR representa uma diretriz importante de pesquisa, considerando a possibilidade da incorporação de resíduos de diversos setores da economia na composição do mesmo.

A geração de resíduos, relacionada ao crescimento populacional, demanda de energia e materiais, é uma das principais causas da atual crise ambiental (BRAGA, 2005). A falta de regularização no transporte, coleta e descarte destes resíduos resulta em um problema ambiental que cresce ano após ano (ARAÚJO e PIMENTEL, 2015).

Do conjunto de indústrias do setor madeireiro, a grande maioria utiliza de caldeiras para geração de vapor em seu processo produtivo, essas são alimentadas por biomassa de origem florestal (WIECHETECK, 2009).

A cinza de madeira representa o resultado final da combustão incompleta da madeira nas caldeiras, quando utilizada como fonte de energia, gerando milhares de toneladas de resíduos, onde a maior parte é descartada em aterros (BENNACK, 2016).

Assim sendo, o presente trabalho se justifica no intuito de promover o estudo de novas estruturas de pavimentação, frente ao pesado tráfego enfrentado pela malha rodoviária nacional, aliado a gestão de resíduos, a fim de reduzir os impactos ambientais gerados direta ou indiretamente pelos mesmos. Para tal, incorporou-se a cinza de madeira como substituição parcial dos agregados miúdos na composição do CCR.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar a viabilidade técnica da substituição parcial, em massa, do agregado miúdo por cinza de madeira, nos teores de 5% e 10% na concepção do CCR a ser utilizado como sub-base de pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a dosagem referência do CCR;
- Caracterizar, por meio de ensaios físicos, os materiais utilizados na composição do CCR;
- Avaliar resistência a compressão axial do CCR na formulação de referência e com substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira aos 14 e 28 dias;
- Analisar as propriedades físicas de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água do CCR com e sem adição de cinzas.

## 1.2 METODOLOGIA

O método utilizado no presente trabalho foi o de pesquisa experimental, que segundo Trivinões (1987), consiste de um processo bastante rigoroso. Uma pesquisa experimental consiste na determinação de um objeto de estudo, delimitação das variáveis que o afetam e a definição de formas de controlar e observar os efeitos que as variáveis produzem no objeto (GIL 2007).

A pesquisa é a atividade nuclear da Ciência. Ela possibilita uma aproximação e um entendimento da realidade a investigar. A pesquisa é um processo permanentemente inacabado. Processa-se por meio de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo-nos subsídios para uma intervenção no real (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009, p.36)

O experimento realizado no trabalho consiste na comparação de propriedades físicas e resistências mecânicas de corpos de prova (CP) de CCR produzidos com

substituição parcial do agregado miúdo, nos teores de 5% e 10%, por cinza de madeira com o CCR de referência (sem nenhuma adição).

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A divisão do trabalho se fez da seguinte forma. No primeiro capítulo, já apresentado, abordou-se o tema, introduzindo aspectos gerais, objetivos e metodologia do mesmo. No segundo capítulo está contida a fundamentação teórica, onde os assuntos essenciais para o entendimento do trabalho são expostos. O terceiro capítulo aborda as matérias primas utilizadas bem como uma detalhada descrição do programa experimental proposto. No quarto capítulo, todos resultados são apresentados e devidamente discutidos. Por fim, o quinto capítulo traz a conclusão do trabalho e sugestões para futuros trabalhos.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 CONCEITOS GERAIS DE PAVIMENTAÇÃO**

Bernucci *et al.* (2008) define, de forma geral, um pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas sobrepostas com espessuras finitas, construídas sobre uma superfície final de terraplanagem. O pavimento rodoviário destina-se técnica e economicamente a resistir os esforços provenientes do tráfego de veículos e ações climáticas, assim como proporcionar ao usuário melhores condições de rolamento, conforto, economia e segurança (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

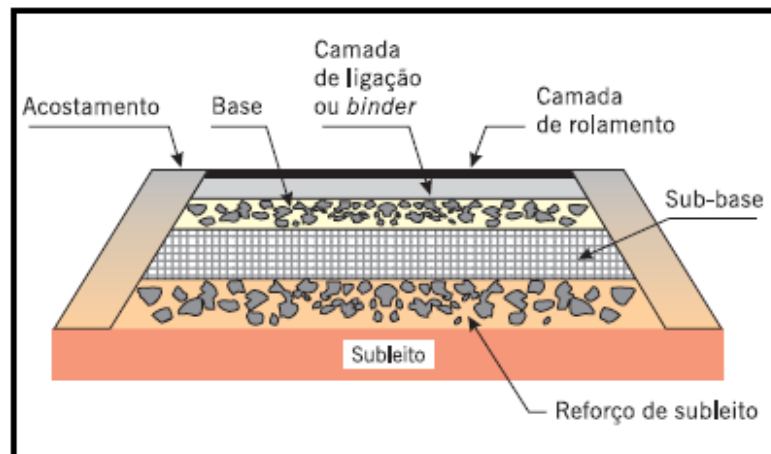
Segundo Balbo (2007), a estrutura do pavimento é concebida para receber e transmitir os esforços oriundos da camada superior de maneira a aliviar as pressões sobre as camadas inferiores, que usualmente são menos resistentes. As camadas devem trabalhar em conjunto, exercendo uma ou mais funções específicas.

Segundo consta no Manual de Pavimentação DNIT (2006), tradicionalmente, os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos.

#### **2.1.1 Pavimento Flexível**

Também conhecidos como pavimentos asfálticos, são formados por quatro camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo das variáveis do projeto, como tráfego e materiais disponíveis, pode-se ter a ausência de algumas camadas (BERNUCCI, *et al.*, 2008). Segundo o DNIT (2006), todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa quando submetidas a um carregamento, o que faz com que carga se distribua de maneira aproximadamente equivalente entre todas as camadas. A Figura 1 apresenta a seção transversal convencional de uma estrutura de um pavimento flexível.

Figura 1 - Seção transversal da estrutura de um pavimento flexível.



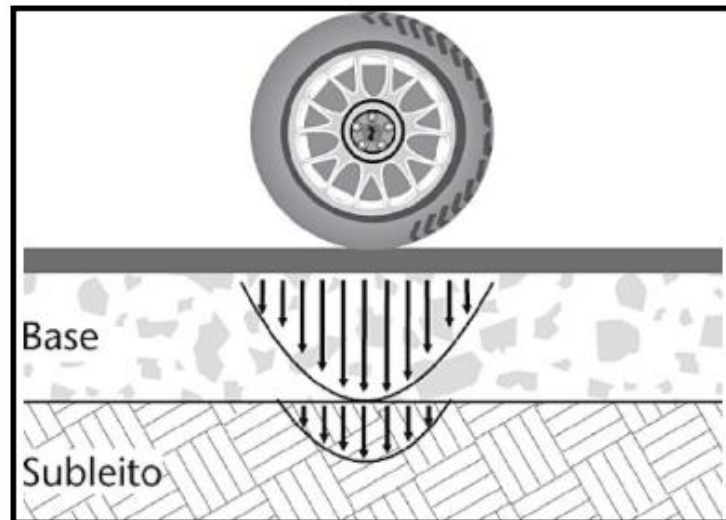
Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

O concreto asfáltico, é um material de comportamento termo-viscoelástico linear, ou seja, apresenta um comportamento sensível às variações de temperatura e frequência de solicitação no domínio das pequenas deformações (GUERRERO, 2013). Segundo o mesmo autor, é essencial compreender as propriedades do material a fim de interpretar corretamente os fenômenos observados na prática.

As camadas de base, sub-base e reforço do subleito tem uma função predominantemente estrutural: resistir aos esforços oriundos do tráfego e distribuí-los ao subleito (MEDINA, 1997). Ainda, este autor comenta que o revestimento é uma camada, tanto quando possível impermeável, que recebe diretamente as ações do tráfego, responsável por proporcionar condições de rolamento mais seguras e confortáveis.

A resposta mecânica resultante da atuação de uma carga aplicada sobre um pavimento flexível é um campo de tensões muito concentrado nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga, conforme representado na Figura 2 (BALBO, 2007).

Figura 2 - Resposta mecânica de pavimento flexível: pressões concentradas.



Fonte: Balbo (2007).

### 2.1.2 Pavimento Semirrígido

O manual de pavimentação do DNIT (2006) caracteriza como um pavimento semirrígido como sendo aquele que tem uma base cimentada por algum tipo de aglutinante com propriedades cimentícias. Um exemplo seria uma estrutura composta por uma camada de base de solo-cimento sobreposta por um revestimento asfáltico, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Estrutura semirrígida tradicional.



Fonte: Balbo (2007).

Há uma certa divergência sobre a nomenclatura deste tipo de pavimento no meio científico devido dificuldade de encontrar um limite de uso para o termo “semirrígido”. A rigidez do material por exemplo, sobre a luz da Ciência dos Materiais,

não se explica apenas por suas constantes mais comuns, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Deformação de ruptura, estimativa da fragilidade do material e tenacidade são exemplos de medidas mais complexas que devem ser consideradas, de modo que não ocorram equívocos sobre a rigidez de uma mistura solo-cimento se comparada a um CCR, visto que essas generalizações são inaceitáveis (BALBO, 2007).

Contudo, Balbo (2007) afirma que com uma análise experimental criteriosa do comportamento mecânico dos materiais, é possível delimitar o uso do termo fixando-se algumas ideias básicas. Segundo o autor, a expressão “pavimento semirrígido” é plenamente aplicável em estruturas que apresentem ao menos uma camada de material tratado com ligante hidráulico, tendo em vista que seu comportamento, sobretudo com a relação à distribuição de tensões sobre o subleito, é sensivelmente diferente dos pavimentos flexíveis. Entretanto, pavimentos que apresentem uma camada de concreto de cimento Portland, vibrado ou compactado, tem um comportamento análogo ao pavimento rígido, portanto é sensato excluir esses casos na delimitação da nomenclatura.

### **2.1.3 Pavimento Rígido**

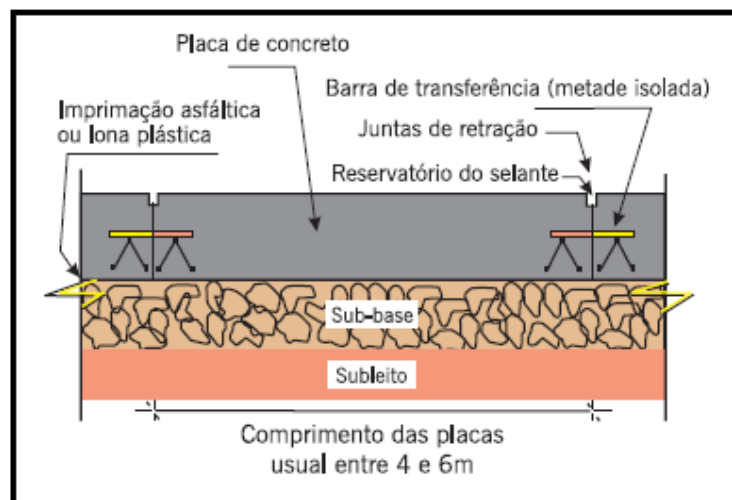
Pavimento rígido ou pavimento de concreto de cimento Portland (CCP), é aquele onde o revestimento, que segundo a concepção tradicional desempenha ao mesmo tempo o papel de base, tem uma grande rigidez se comparada com as camadas inferiores, absorvendo grande parte das tensões advindas do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

Os pavimentos rígidos são constituídos principalmente por lajes de cimento Portland sendo que a espessura da camada do revestimento é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes Bernucci (2008). As placas de cimento geralmente são apoiadas sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com ligante hidráulico, que por sua vez é disposto sobre o subleito ou sobre um reforço de subleito quando necessário (SENÇO, 1997 *apud* QUEIROZ, 2011). É usual designar a camada subjacente ao revestimento desse pavimento como sub-base, uma vez que qualidade do material equivale a sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

As placas de concreto que formam o revestimento do pavimento usualmente são divididas por juntas, moldadas ou serradas, que tem como função evitar a fissuração pela retração do concreto. As juntas são classificadas como transversais, quando são ortogonais ao eixo da via, ou longitudinais, quando estão dispostas no sentido do eixo da via. Em ambos os casos devem ser preenchidas por um material selante, de modo a conferir impermeabilidade e flexibilidade às juntas (OLIVEIRA, 2011 *apud* MULLER, 2016).

As juntas transversais devem conter barras de transferência, de forma a assegurar que as placas suportem os esforços solicitantes através da transferência de carga de uma placa carregada para uma placa adjacente. Juntas longitudinais podem conter barras de ligação, que garantem o atrito e o comportamento solidário entre as placas, prevenindo-as de deslocamentos laterais indesejáveis (Senço, 2001). A figura quatro representa a seção transversal de uma estrutura de um pavimento rígido.

Figura 4 - Seção transversal da estrutura de um pavimento rígido.



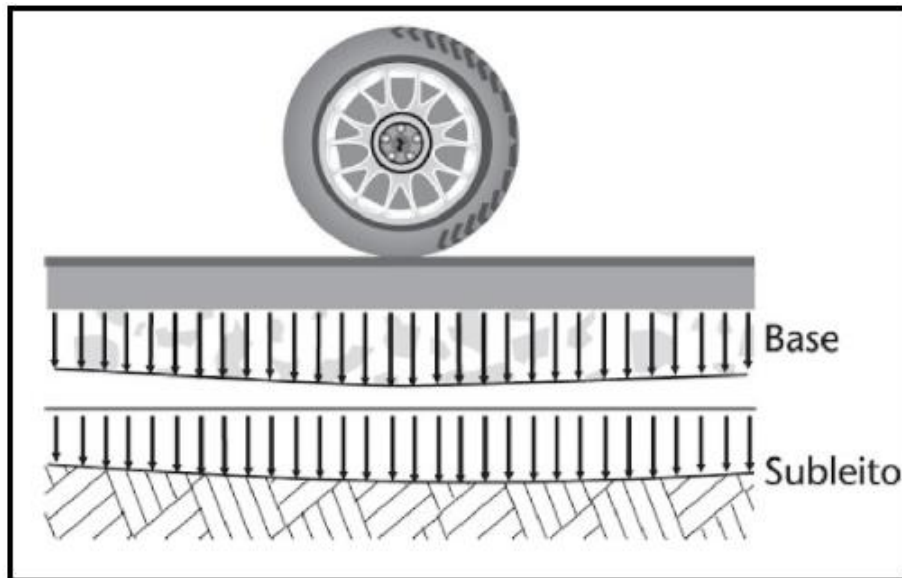
Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

O termo “sub-base” não é a terminologia mais adequada na designação da camada inferior a uma placa de concreto de cimento Portland, apesar de ser normalmente utilizada. A razão para seu amplo uso reside na ideia equivocada que a placa de concreto de cimento Portland faz o papel de base e sub-base simultaneamente, o que não é verídico, pois a base não tem uma função meramente

estrutural, exerce também uma função hidráulica, no caso de a camada ser constituída por um material granular (BALBO, 2007).

Segundo Balbo (2007), em um pavimento rígido, a resposta mecânica resultante da aplicação de carga resulta em um campo de tensões bem mais disperso se comparado a resposta do pavimento flexível, o que proporciona menores magnitudes de esforços verticais sobre o subleito, conforme apresenta a Figura 5.

Figura 5 - Resposta mecânica de pavimento rígido.



Fonte: Balbo (2007).

O uso do pavimento rígido a cada dia se torna uma alternativa de maior relevância, visto sua vantagem estrutural em relação ao pavimento flexível em tráfegos pesados e intensos. A estrutura de pavimento asfáltico está mais suscetível a deformações permanentes, por isso de acordo com BAUER (1995), pavimentos rígidos são mais recomendados para rodovias com alto volume de tráfego.

Além disso, pavimentos de CCP oferecem uma maior aderência dos pneus com o asfalto em relação ao concreto betuminoso, conferindo ao usuário da pista melhores e mais seguras condições de rolamento (MESQUITA, 2001).

No âmbito econômico, o pavimento de CCP tem maior custo de implantação, cerca de 42% mais caro que o pavimento flexível, isso se dá pelo fato que a técnica de pavimentação asfáltica é consideravelmente mais difundida no país. Contudo, analisando o investimento final ao longo da vida útil da estrutura, o pavimento rígido se torna mais competitivo que o flexível, pois o pavimento asfáltico requer maiores e



mais constantes gastos de manutenção (FILHO e ROCHA, 2018). Se faz necessária a manutenção de um pavimento flexível 10 anos após a abertura da via, enquanto para o pavimento rígido esse horizonte gira em torno de 25 anos (MORAES *et al.*, 2013).

O aumento na implantação de pavimentação rígida no país tem trazido grande incentivo para estudos relacionados, o que proporcionou um crescimento no investimento e a introdução de novas tecnologias na área (BASTIANI, 2015). Segundo Silva (2006), o CCR é uma técnica que merece atenção, visto que combina baixo custo e facilidade de execução. Por ser um material rígido, distribui o carregamento de forma mais uniforme sobre o subleito, o que minimiza os efeitos negativos gerados pelo carregamento do pavimento (DIAZ, 1993).

## 2.2 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

Segundo Andrade (1997), o CCR ou concreto rolado, é um material de consistência seca, não mensurável pelo ensaio de abatimento do tronco de cone. Harrington *et al.* (2010) afirma que uma das maiores distinções entre o CCR e o CCP convencional é a quantidade de finos, que se encontram em maior porcentagem na composição do CCR, o que garante à mistura um maior grau de empacotamento e consolidação.

Seu nome é dado em função de seu método de construção, que devido a sua trabalhabilidade particular, utiliza da energia de compactação de rolos lisos, estáticos ou vibratórios para a densificação do concreto (RASHAD, 2010). É empregado como sub-base, base e revestimento de pavimentos, também é usualmente utilizado como material para formação do corpo de barragens (MARQUES, 2009).

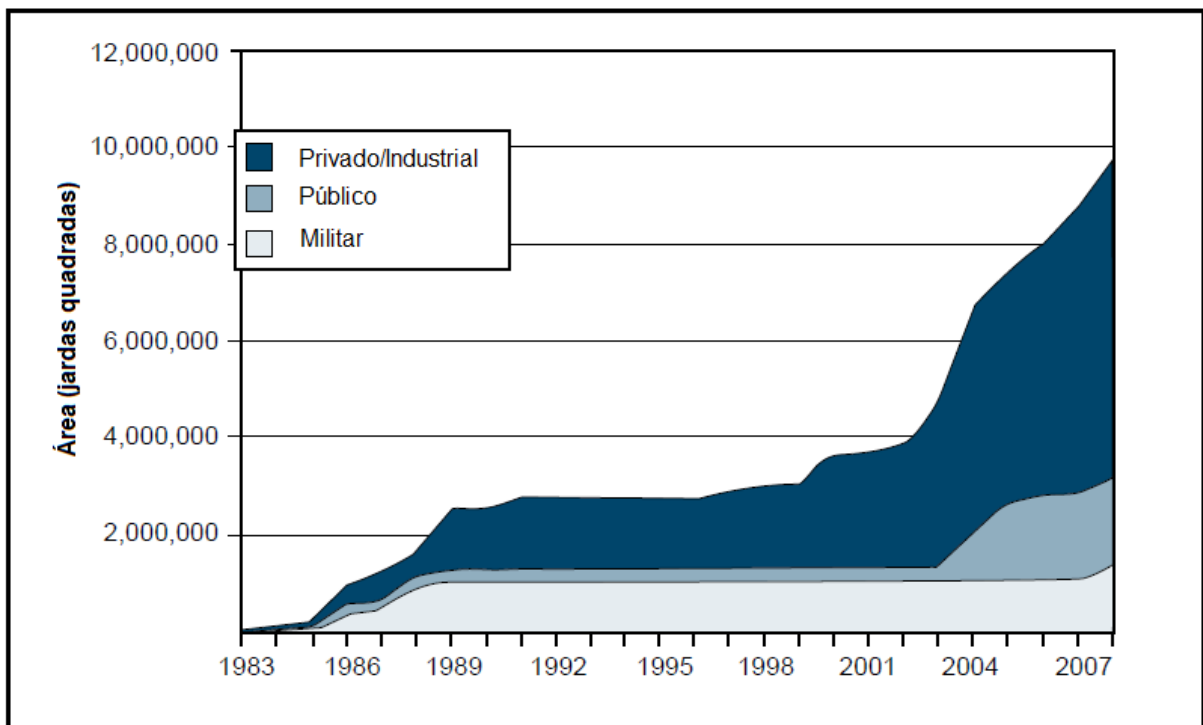
### 2.2.1 Histórico

A ideia do uso do CCR na construção de pavimentos não é recente. Em 1893, em Bellefontaine, no Estado de Ohio nos Estados Unidos da América (EUA) foi construído o que pode se definir como primeiro pavimento de CCR, por apresentar consistência e um processo de compactação semelhantes aos observados atualmente (SILVA, 2006 *apud* PASKO, 1998). No ano de 1910, em Grand Folks,

Dakota do Norte EUA empregou-se o CCR na pavimentação urbana, e em 1935, na Bélgica em uma estrada rural (RICCI, 2007).

Nos anos 70, devido à crise de petróleo, o custo da construção rodoviária com concreto asfáltico aumentou sensivelmente, gerando um impulso notável nos estudos e aplicações do CCR (TRICHÊS, 1993). Na mesma época, países como EUA, Espanha, Inglaterra e Canadá já possuíam diversas obras de pavimentação realizadas com o uso desta tecnologia. A economia advinda de seu uso variava de 15 a 30%, dependendo do tipo de obra (PITTMAN, 1985). O Gráfico 1 apresenta o crescimento, ao passar do tempo, do uso do CCR nos EUA.

Gráfico 1 - Crescimento do uso do CCR nos EUA.



Fonte: adaptado de Pittman, 2009 *apud* Harrington *et al.*, 2010.

A partir da década de 1980, diversos países como o Japão, Austrália, África do Sul, Noruega, Suécia, Chile e Argentina começaram a investir em pesquisas e experimentos com CCR, procurando adaptar esta nova tecnologia às condições regionais de cada país (SILVA, 2006).

Existem alguns registros históricos do uso do CCR no Brasil, o primeiro uso da tecnologia data de 1946, com a pavimentação do Vale do Anhangabaú. No ano de

1950 ocorreu a pavimentação do aeroporto de Congonhas e em 1954 alguns pavimentos da cidade do Rio de Janeiro (ANDRIOLO, 1998).

Conforme Fujimura *et al.* (1995) no início da década de 70 o CCR teve um grande desenvolvimento no país, sendo empregado em pavimentos de áreas urbanas de várias cidades, em rodovias, em pátios industriais e construção de barragens. Uma obra de bastante expressão foi executada em Porto Alegre – RS, onde o CCR foi utilizado como base em pavimentos asfálticos de vias urbanas. Foram executados pavimentos constituídos por uma base de 200 milímetros (mm) de CCR sob revestimento asfáltico de 100 mm, tendo aproximadamente 1700 metros (m) de extensão (SACHET, 2012).

Recentemente, o país tem feito o uso desta tecnologia para a pavimentação de diversas rodovias, sendo empregada principalmente como base e sub-base de pavimentos rígidos. Marginais da Rodovia Castelo Branco – SP (2002), Rodovia dos Imigrantes – SP (2002), SP 79 (2001) e BR 232 – PE (2003) são exemplos, tendo como destaque o Rodoanel Mário Covas em seu trecho oeste – SP, que contem 32 km de extensão e 4 faixas de rolamento (RICCI, 2007).

### **2.2.2 Características**

O CCR, desde que sejam aplicados materiais de qualidade e uma formulação correta, apresenta propriedades similares ou, por muitas vezes, superiores que o CCP, devido à alta energia de compactação empregada em seu processo construtivo (RIBEIRO e ALMEIDA, 200).

Segundo Balbo (2007), o CCR não deve ser classificado como material estabilizado com ligante hidráulico, mas como concreto, tendo em vista que seu comportamento após a cura é análogo aos concretos tradicionais.

O CCR desempenha um papel fundamental na estrutura de pavimentos rígidos. O seu emprego evita o bombeamento de finos, serve como controlador de expansão de alguns tipos de solos encontrados nos subleitos, além de melhorar as condições estruturais do pavimento como um todo (SACHET, p. 48, 2012).

O corpo de engenheiros do exército dos EUA (USACE, 2000) cita as principais propriedades mecânicas do CCR destinadas à pavimentação:

- Resistência à compressão simples: É utilizada como parâmetro de resistência média e durabilidade. CCRs apresentam resistências na faixa de 6,9 megapascais (MPa) a 27,6 Mpa.
- Resistência à Flexão: O CCR apresenta uma resistência de 5 a 15% do valor sua resistência a compressão, dependendo da qualidade dos agregados, tempo de cura e método utilizado.
- Resistência ao cisalhamento: É a propriedade mais relevante para construção de barragens. A razão entre a coesão e a resistência à compressão varia, atingindo valores de até 20%, com valores em torno de 0,5 MPa e 4,1 MPa.
- Módulo de elasticidade: Uma das propriedades que torna o CCR excepcionalmente vantajoso na construção de barragens é o baixo módulo de elasticidade, alcançado com a utilização de agregados de baixa qualidade. Valores típicos estão entre 30 a 70 GPa para um ano de cura
- Massa específica: Depende principalmente da massa específica dos agregados e do grau de compactação. Os valores típicos se encontram na faixa de 2240 a 2560 quilogramas kg/m<sup>3</sup>.

Segundo Pitta e Diaz (1991) *apud* Silva (2006), as propriedades do CCR variam fundamentalmente de acordo com o consumo de cimento, quantidade de água, características do agregado, métodos e energia de compactação adotada, uso de ativos, tempo de cura, etc. Na tabela a seguir são apresentados os principais fatores que afetam as propriedades do CCR.

Tabela 1 - Fatores que afetam as propriedades do CCR.

PROPRIEDADES	FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DO CCR									
	C	TC	U	E	G	TA	A	Cur	Id	TS
Resistência à compressão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Resistência à tração na flexão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Módulo de elasticidade	•	•	•	•	•	•			•	
Retração por Secagem	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Durabilidade	•	•	•	•			•	•		•
Permeabilidade	•	•	•	•			•	•	•	•

Fonte: Adaptado de Pitta e Diaz 1991, *apud* Silva 2006.

**C** - Consumo de cimento

**TC** - Tipo de cimento

**U** – Umidade

**E** – Energia de compactação

**G** – Granulometria

**TA** – Tipo de Agregado

**A** – Aditivo

**Cur** – Cura

**Id** – Idade

**TS** – Textura superficial do agregado

Godinho e Grossi (1991) *apud* Sachet (2012) destacam as características tecnológicas que julgam mais importantes para o CCR:

- O consumo de cimento varia entre 85 e 280 kg/m<sup>3</sup>;

- Pode ser produzido *in-loco*, com a utilização de equipamentos convencionais, como uma betoneira estacionária;
- Sua resistência à compressão aos 28 dias está situada na faixa de 5,0 MPa a 35,0 MPa;
- Resistência à tração na flexão aos 28 dias entre 1,0 MPa e 4,0 MPa;
- Umidade ótima em torno de 6%;
- Possui um módulo elástico de deformação aos 28 dias entre 14.000 MPa e 30.000 MPa.

O CCR, se comparado ao CCP, leva uma quantidade menor de cimento, água e agregados graúdos, contudo, tem um aumento substancial na proporção de agregados miúdos em sua composição. Esse aumento se faz necessário pela necessidade de produzir uma mistura que seja estável sobre a ação do rolo compactador (Canadian Portland Cement Association, 20-).

A Tabela 2 traz uma síntese das principais diferenças entre o CCR e o CCP.

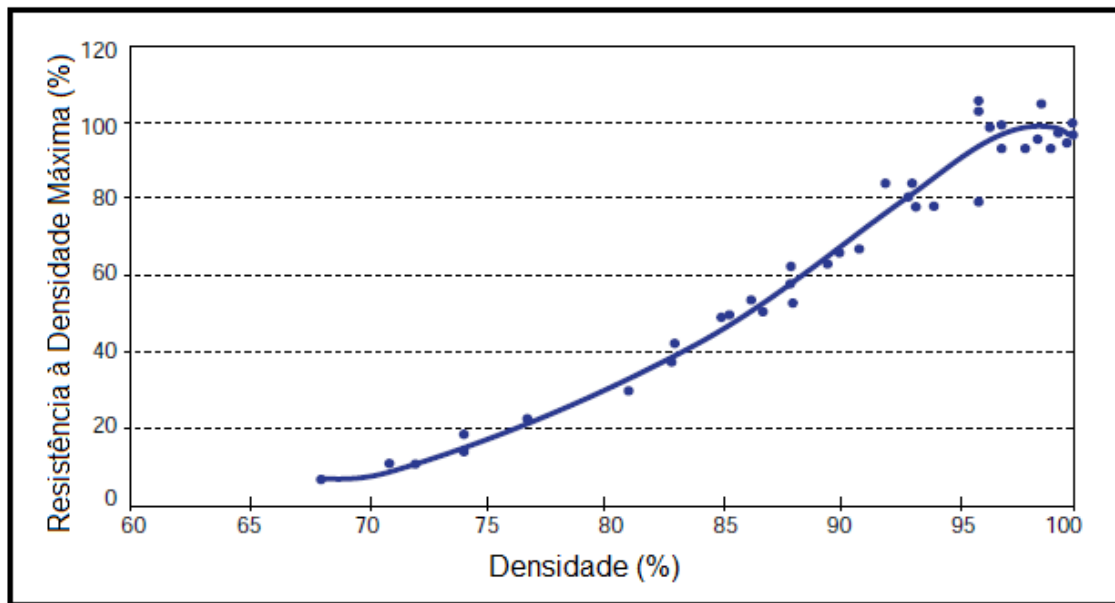
Tabela 2 - Diferenças entre pavimentos de CCP e CCR.

	<b>Pavimentos em Concreto Convencional</b>	<b>Pavimentos em CCR</b>
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 do agregado preenchendo assim os vazios da mistura.	Agregados preenchem de 75% a 85% do volume da mistura. Possuem uma consistência mais seca devido ao maior teor de finos e menor teor de cimento e água
Trabalhabilidade	Flúida	Cosistência mais densa, seca.
Acabamento	Mecanicamente textunizado	Apresenta textura bastante similar ao concreto asfáltico, mas em alguns casos, assemelha-se a textura de um concreto convencional.
Fratura, transferência de carga e reforço	A localização de fissuras é controlada pelas juntas de dilatação, colocação de barras transversais para a transferência de carga e barras longitudinais que mantem o intertravamento dos agregados.	O CCR dificilmente apresenta juntas. A transferência de cargas se dá pelo primordialmente pelo intertravamento entre as partículas. Por ser consolidada não é possível a inserção de armaduras para reforço.

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

A compactação, em suma, é o processo de expulsão do ar presente entre as partículas do agregado da mistura de CCR, gerando um aumento de sua densidade. A melhor performance é obtida quando, após a execução, o CCR não apresenta nenhum tipo de segregação e apresenta uma densidade próxima à máxima. A resistência da mistura tem uma notável queda quando apresenta uma baixa densidade (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Gráfico 2 - Resistência x Densidade para diversas misturas de CCR.



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

Atributos como grande velocidade de execução, elevada resistência mecânica e baixo custo são exemplos de vantagens e benefícios do uso do CCR como camada de pavimento rodoviário (MOLINA, 2002). No próximo item será discutido com mais afinco as características que consagram o CCR como uma excelente opção de base e sub-base de pavimentos.

### 2.2.3 Vantagens e benefícios do uso CCR como camada de pavimento rodoviário

Até o final da década de 1960, o material utilizado na construção da base de pavimentos no estado de São Paulo era o solo-cimento. Nessa mesma época a brita graduada tratada com cimento (BGTC) teve seu uso difundido com a construção da Rodovia Castello Branco, tornando-se uma alternativa muito popular na década de 1980 (RICCI, 2007).

Estes dois tipos de base apresentam um comportamento significativamente diferente quanto ao seu desempenho. No solo-cimento a pasta de cimento hidratada envolve as partículas do solo, criando uma matriz que fixa as partículas não aderidas. No caso da BGTC a pasta de cimento não consegue envolver totalmente os agregados, gerando apenas ligações pontuais entre os grãos. A resistência desse tipo



de mistura depende da resistência do agregado e das ligações geradas pela pasta de cimento hidratada (BALBO, 1993 *apud* RICCI, 2007).

Esses dois tipos de bases, para um elevado número de repetições de carga, apresentam um elevado módulo de elasticidade, sem apresentar um aumento significativo na sua resistência à tração na flexão. Isso pode gerar problemas estruturais significativos, visto que bases “rígidas” tem como principal função resistir aos esforços de flexão, deixando a camada de revestimento trabalhando em compressão (RICCI, 2007).

Outro problema relacionado a esses dois tipos de base está na pequena quantidade de argamassa existente na mistura, que gera problemas de heterogeneidade do material, influenciando negativamente na fadiga da estrutura em serviço. A baixa resistência à tração na flexão e o problema da heterogeneidade da mistura são os principais motivos da falha estrutural precoce de uma camada de base “rígida” (BALBO, 1996 *apud* RICCI, 2007).

Apesar de ambas as bases apresentarem algumas vantagens frente as bases puramente granulares, em vista do que foi discutido acima, se faz necessário o estudo de outras alternativas para pavimentação. O CCR vem se mostrando uma excelente escolha, pois apresenta diversos benefícios e propriedades que o legitimam como uma camada de base ou sub-base competente.

Andrade (1997) e Harrington *et al.* (2010), citam algumas vantagens do uso do CCR como camadas de pavimentação rodoviária:

- Um teor menor de cimento na mistura, que resulta em uma menor retração do concreto e, conseqüentemente, menos fissuras relacionadas a retração;
- O CCR possibilita a concepção de camadas com grande resistência a flexão, compressão e cisalhamento, o que permite o suporte de cargas repetitivas e pesadas sem apresentar falha estrutural;
- Apresenta uma ótima resistência a ataques químicos devido a sua baixa permeabilidade, mesmo em condições de gelo e degelo;
- Exibe uma grande resistência a abrasão, de maneira análoga ao que ocorre em pavimentos rígidos;
- Apresenta uma flexibilidade quanto a origem do agregado miúdo, podendo-se utilizar agregados naturais ou artificiais;

- Agregados miúdos não adequados para pavimentos asfálticos podem ser utilizados na composição mineralógica do CCR;
- Redução de custo se comparado ao concreto asfáltico e ao CCP, visto o baixo consumo de cimento do CCR;
- Vida útil de 20 anos, com poucas manutenções;
- Seu processo construtivo pode ser realizado com o uso de máquinas convencionais, utilizadas comumente nos processos de pavimentação flexível;
- Uma economia de 15% a 30% se comparado com estruturas convencionais equivalentes.

Segundo Molina (2002) um dos principais atributos do CCR é sua grande velocidade de execução, de duas a três vezes maior que os pavimentos de CCP ou asfálticos. Oferece uma abertura quase que imediata ao tráfego, devido a estabilidade que o esqueleto dos agregados possui logo após sua compactação.

Balbo (2005) *apud* Ricci (2007) ainda cita como principais qualidades do CCR:

- Sua elevada rigidez, que contribui de maneira decisiva para se evitar o surgimento de deformações em trilhas de roda nas misturas asfálticas de revestimento.
- Atende mais facilmente o grau de compactação desejado para o revestimento;
- Resistência a fadiga superior que bases estabilizadas com cimento;
- Arranjos granulométricos mais permissivos, que resultam em concretos com elevada resistência à tração na flexão e consumos de cimento relativamente baixos.

#### **2.2.4 Limitações do CCR**

Segundo Pittman (1985), um dos principais limitantes do CCR quanto ao seu uso em pavimentação são as irregularidades superficiais formadas durante o processo de compactação, que resultam em uma superfície muito rugosa, o que diminui a qualidade de rolamento da via e torna seu uso indesejável para tráfegos em alta velocidade. Outra grande limitação do CCR, de maneira geral, se refere ao local de

aplicação, visto que em muitas situações a compactação se torna impraticável (SILVA, 2006).

Harrington *et al.* (2010) também aponta outras desvantagens quanto ao uso do CCR:

- O volume de CCR misturado em um caminhão betoneira é tipicamente menor que o CCP, pelo fato da consistência seca da mistura de CCR;
- A partir do momento que a camada de CCR é finalizada, a pista adjacente deve ser executada em até uma hora, a fim de garantir uma boa ligação;
- A compactação das bordas dos pavimentos é mais difícil, tendo isso em vista o grau de compactação é reduzido de 98%, que é o usual na seção central das pistas de rolagem, para 96%;
- Devido à baixa umidade da mistura, em climas quentes é necessário um cuidado extra para minimizar as perdas de água na mistura por evaporação;
- Pela consistência seca, os requisitos de dosagem das misturas de CCR tendem a ser mais criteriosas que o CCP.

Apesar de apresentar algumas limitações e desvantagens frente a outros métodos construtivos, o CCR apresenta suficientes benefícios e vantagens estruturais que o legitimam como uma tecnologia promissora. A eficácia do CCR como base de pavimento foi comprovada por diversos experimentos no mundo. Em 2004, no estado da Geórgia dos EUA, o CCR foi utilizado para reconstruir os acostamentos da estrada interestadual 285, sendo o primeiro uso deste processo construtivo em estradas interestaduais do país (SACHET, 2012).

A dosagem correta dos materiais, como já citado acima, tem crucial importância para a boa qualidade do CCR. O próximo tópico será dedicado a apresentar a metodologia de dosagem que será utilizada no presente trabalho.

### **2.2.5 Metodologia de dosagem do CCR**

O procedimento de dosagem do concreto, independente se ele for seco, plástico ou auto adensável, tem como objetivo assegurar a resistência requerida do material, compatibilizando os materiais constituintes com os equipamentos destinados

à sua produção e compactação ou adensamento, de forma mais econômica possível (SILVA, 2006).

Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais (TUTIKIAN e HELENE, 2011, p. 1)

O procedimento de dosagem do CCR é semelhante ao utilizado para o CCP, tendo como principal diferença o baixo teor de água utilizado, que influi diretamente em algumas características mecânicas do material e sua trabalhabilidade, tendo em vista que a mistura deve ser estável suficiente para suportar a carga aplicada por um rolo compactador (USACE, 2000).

Em concretos plásticos, a pasta de cimento hidratada preenche quase todos os vazios existentes entre os interstícios do agregado; no entanto, em concretos secos, o volume de ar presente na mistura é bastante significativo. Deste modo, o CCR não segue o princípio já bem estabelecido para concretos plásticos, que afirma que uma menor quantidade de água leva a uma resistência mecânica superior do concreto (TANGO, 1994).

Consequentemente, a dosagem do CCR é ordenada pelo método de menor número de vazios, que em suma é a obtenção da melhor proporção entre os agregados de maneira a compor um esqueleto mineralógico com o menor volume de vazios possível (SILVA, 2006). Segundo Ricci (2007, p. 33) “A máxima densidade específica teórica possível para uma mistura varia de acordo com o índice de vazios dos agregados e o conteúdo de pasta usado”.

Trichês (1993) define um procedimento de dosagem para o CCR:

I – Definição da composição granulométrica dos agregados;

II – Fixado o consumo de cimento **Cc** e o teor de umidade **h**, calcula-se a proporção **m** através da Equação (1). É importante ressaltar que para cada variação de umidade **h** é obtido um valor diferente de **m**.

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

Onde:

**C<sub>c</sub>** – Consumo de cimento da mistura em kg/m<sup>3</sup>;

**V** – Volume de vazios da mistura em litros;

**m** – Quantidade de agregado total por quantidade de cimento em um metro cúbico de CCR;

**h** – Teor de umidade da mistura em %

**ME<sub>c</sub>** – Massa específica do cimento, em kg/m<sup>3</sup>

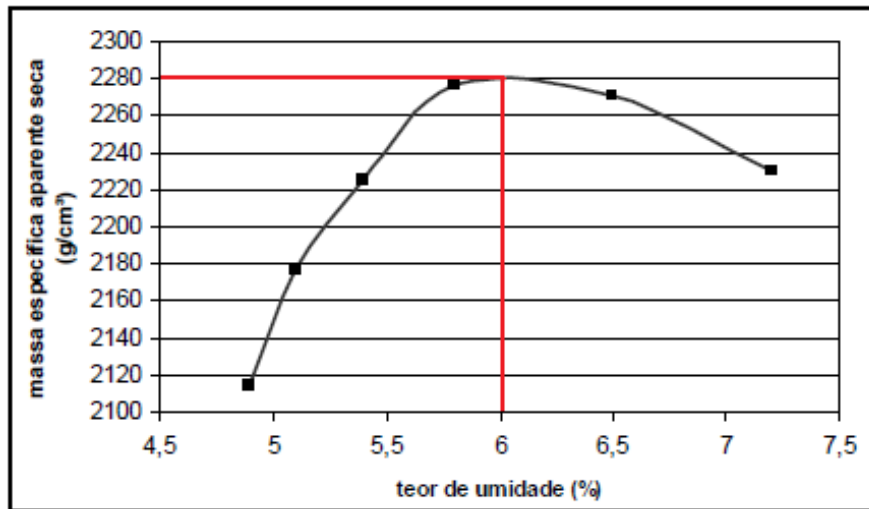
**ME<sub>ag</sub>** – Massa específica do agregado, em kg/m<sup>3</sup>

**III** – Com o valor de **m** é possível definir, a partir da composição granulométrica já estabelecida, a proporção de agregados para 1 kg de cimento.

Para realização da presente pesquisa, o teor de umidade fixado na utilização da equação (1) foi estabelecido a partir da umidade ótima de estudos anteriores, a fim de obter-se a massa específica aparente seca máxima da mistura.

Adotou-se um volume de vazios **V** de 5%. Marchand *et al.* (1998) afirma que, apesar da grande variação de métodos de compactação, todas as misturas experimentais estudadas pelo autor apresentavam um volume de vazios de 5% ou pouco abaixo disso, acreditando que convencionalmente valor que deve adotado varia de 4% a 5%.

A umidade ótima de mistura, que corresponde a massa específica aparente seca máxima, pode ser determinada através da curva de compactação obtida através do ensaio de compactação Proctor, de maneira análoga ao processo que ocorre na compactação de solos (TRICHÊS, 1993). O gráfico 3 mostra uma curva de compactação de um CCR com consumo de cimento de 90 kg/m<sup>3</sup>.

Gráfico 3 - Curva de Compactação de CCR com consumo de cimento de 90 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: adaptado de Ricci, 2007.

O aumento da massa específica seca com o aumento de água ocorre porque a mistura mais úmida facilita a compactação devido a uma melhor acomodação das partículas, o que reduz o número de vazios. A partir de uma determinada umidade a água deixa de exercer apenas a ação lubrificante que ajuda na acomodação do agregado e começa a tomar o lugar das partículas granulares, diminuindo assim sua massa específica (VARGAS, 1977 *apud* RICCI, 2007).

O baixo consumo de cimento em relação a outras alternativas construtivas torna o CCR uma opção mais ecológica, visto que o processo de fabricação do cimento é altamente poluente. A manufatura do cimento contribui, em média, com 5% a 7% da emissão de CO<sub>2</sub> no mundo, um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa (MCLELLAN *et al.*, 2001).

### 2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS

Atualmente, na construção civil, em razão do elevado uso de recursos naturais e, conseqüentemente, da geração de resíduos, existe um crescente estudo sobre sustentabilidade. Assim torna-se cada vez mais necessário pesquisas sobre a utilização dos resíduos gerados pela indústria, de forma a otimizar seu descarte, proporcionando um desenvolvimento mais sustentável, com menos impactos ambientais (ÂNGULO *et al.*, 2001).

A Resolução do Conama n. 001 (1986) define como impacto ambiental qualquer tipo de alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente ocasionadas pela atividade humana e, que de alguma forma, possa afetar:

- A segurança e a saúde da população;
- Atividades sociais ou econômicas;
- A biota;
- O meio ambiente do ponto de vista estético ou sanitário;
- As características dos recursos ambientais.

A geração de resíduos está ligada principalmente ao setor industrial, que recorre aos aterros sanitários como destinação final mais comum (MALTZ, 2003). O tratamento, transporte, disposição, manutenção e monitoramento dos resíduos são os principais custos relacionados à disposição dos resíduos em aterros sanitários (RIBEIRO, 2010).

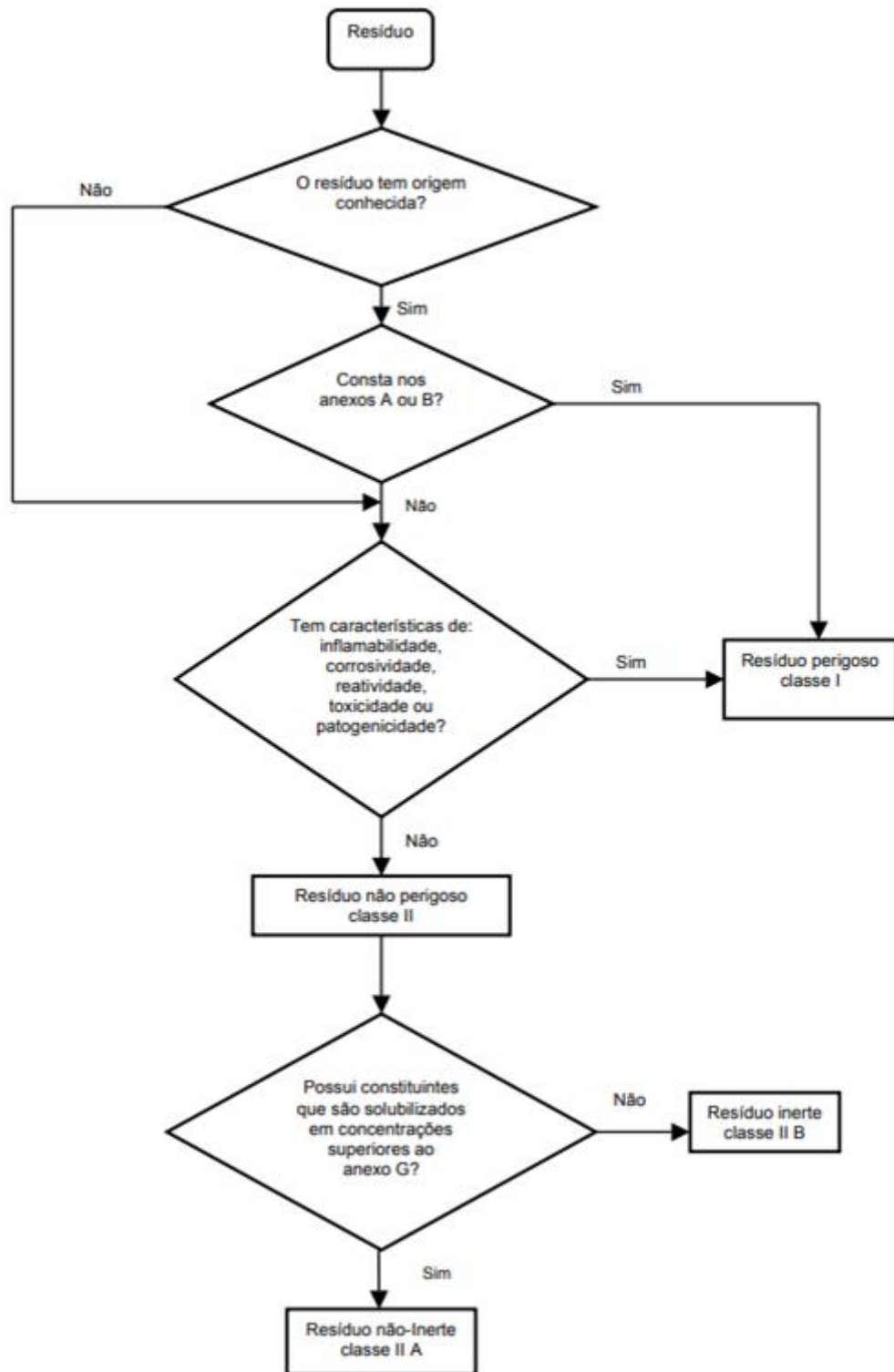
É importante ter o conhecimento sobre as características de lixiviação e solubilização dos resíduos, posto que com o discernimento destas propriedades é possível estimar se o material gerará impactos ambientais consideráveis quando utilizado ou armazenado. Ensaio de solubilização, lixiviação e até uma análise de sua estrutura e composição química podem apresentar o comportamento do material dissolvido e lixiviado (ROHDE, 2002).

Segundo a ABNT/NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos são classificados em:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II – Não perigosos
  - Classe II A – Não inertes;
  - Classe II B – Inertes

Resíduos da Classe II A podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. A Classe II B é constituída de quaisquer resíduos que não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de solubilidade da água, salvo aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, segundo os padrões estabelecidos pela ABNT/NBR 10006 para o ensaio de solubilização. A figura 6 expõe essa classificação.

Figura 6 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos.



Fonte: ABNT/NBR 10004, 2004.

A queima de madeira como fonte energética gera uma considerável quantidade de resíduos, segundo Borlini *et al.* (2005), é gerado mensalmente mais de 310 toneladas de cinza de madeira provenientes apenas do setor de cerâmicas



vermelhas. O processo de queima da madeira em caldeiras gera elementos nocivos ao meio ambiente que, conseqüentemente, causam danos à saúde da população.

No Brasil existe uma falta de regularização quanto a destinação final de resíduos industriais, gerando um problema ambiental crescente ano após ano (ARAÚJO e PIMENTEL, 2015).

Segundo Borlini *et al.* (2005), uma opção viável para reduzir os impactos ambientais causados pela produção e descarte inapropriado de resíduos é a sua incorporação em produtos da indústria da construção civil. A recuperação de resíduos pela construção civil vem se mostrando como uma importante prática para sustentabilidade, seja atenuando os impactos ambientais ou diminuindo custos (ÂNGULO *et al.*, 2010).

## 2.4 ADIÇÃO DE MINERAIS

O setor da construção civil apresenta diversas atividades com elevada geração de impactos ambientais, tendo em vista que o ramo apresenta um enorme consumo de recursos naturais. No Brasil, a construção civil utiliza entre 20% e 50% do volume de recursos naturais consumidos pela sociedade (MESQUITA, 2012).

A indústria da construção civil, pela viabilidade da incorporação de resíduos em sua cadeia produtiva e crescente necessidade de redução de custos, apresenta grande potencial de consumo de resíduos (ROCHA e CHERIAF, 2003).

Segundo Dal Molin (2005), resíduos de origem industrial, que muitas vezes seriam descartados em grande quantidade em locais inapropriados gerando um risco de contaminação do solo e água, são as adições minerais mais utilizadas na construção civil.

O termo adição, de uma forma abrangente, refere-se a qualquer material que não seja água, agregado ou cimento que seja incorporado em qualquer etapa da produção do concreto (MALHOTRA e METHA, 1996). Segundo a ABNT/NBR 11172 (1990, p.4) adições são “Produtos de origem mineral adicionadas aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”.

Segundo Malhotra e Metha (1996) *apud* Bennack (2016) os benefícios advindos da utilização de adições podem ser divididos em três categorias:

- Benefícios de engenharia: o aumento de finos na composição granulométrica do concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água necessária para alcançar a consistência desejada, o que, no geral, se traduz em um incremento de resistência, redução de permeabilidade e aumento de resistência a ataques químicos;
- Benefícios econômicos: o cimento Portland é o constituinte mais caro do concreto, alguns tipos de adições reduzem a quantidade de cimento na mistura que, conseqüentemente, diminui o custo final do concreto;
- Benefícios ecológicos: grande parte dos resíduos e subprodutos utilizados como adições contem em suas composições químicas, substâncias poluentes, tóxicas ou patogênicas que se descartados incorretamente, podem ser nocivos ao meio ambiente.

Dal Molin (2005) classifica as adições minerais em função das características físico-químicas, dividindo-as em três grupos:

- Material cimentante: são materiais que não necessitam do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes. No entanto, sua auto hidratação é frequentemente lenta e a quantidade de compostos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais;
- Material pozolânico: é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que naturalmente não possui propriedades cimentícias, porém, na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes;
- Material não reativo: é o filler, caracterizado por um material finamente dividido, sem atividade química. Sua ação é basicamente um efeito físico de empacotamento granulométrico, promovendo o preenchimento dos vazios, aumentando a compacidade e, conseqüente, o refinamento de poros da mistura.

Rocha e Cheriaf (2003) afirmam que para utilização adequada dos resíduos e subprodutos industriais, é necessário estudos, levando em conta critérios técnico-científicos, fornecendo além de seus aspectos qualitativos, como textura, forma, granulometria, cor e capacidade de se aglutinar, seu comportamento ao longo do

tempo, a fim de evitar danos ao meio ambiente e contaminação de edificações. Segundo os autores, para melhor aproveitamento é necessário um completo conhecimento do processo da geração desses resíduos, sua caracterização física e química e identificação do potencial de aproveitamento, indicando as limitações de sua aplicação.

Conforme o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002), resíduos industriais são resultantes de processos industriais, encontrados nos estados sólidos, semi-sólidos ou gasosos, que apresentem peculiaridades que inviabilizem seu descarte na rede pública de esgotos ou em corpos de água.

Dentre as técnicas para utilização de resíduos industriais, sobretudo agroindustriais, destaca-se sua utilização como combustível. A incineração apesar de possibilitar uma redução considerável do volume, é responsável por gerar outros resíduos como cinzas, lodo e escórias, que precisam ser descartadas de acordo com a tecnologia disponível e a legislação ambiental vigente (LIMA, 2008). Dentre os subprodutos dos resíduos industriais destacam-se as cinzas como principal resíduo gerado, sendo estas oriundas de processo de secagem, geração de vapor e energia (LIMA, 2008).

A princípio, qualquer cinza de origem vegetal ou industrial que apresente uma composição química predominantemente siliciosa no estado amorfo e finura adequada, pode ser utilizada como adição mineral pozolânica (FREIRE e BERALDO, 2003).

Dentre os estudos realizados na área, evidenciam-se as pesquisas realizadas com cinzas de potencial pozolânico, utilizadas como adições minerais ao cimento Portland ou em substituição parcial do mesmo em matrizes cimentícias, como cinza de casca de arroz, do bagaço de cana de açúcar e da folha de bananeira (WINCKLER, 2015). Contudo, a utilização das cinzas como filler também tem mostrado grande potencial, a cinza de fundo vem sendo utilizada como substituição parcial da areia na produção de blocos de concreto e, em muitos países, empregada na base de pavimentos rodoviários (CHERIAF *et al.*, 1999 *apud* BENNACK, 2016). No presente trabalho, optou-se pela adição de cinza de madeira como filler, substituindo parcialmente a areia pela cinza na composição granulométrica do CCR.

A composição das cinzas pode ser bastante variada, variando em função da planta utilizada para a combustão, idade e métodos de armazenamento (HORTA *et*

*al.*, 2010). Cheah e Ramli (2011) também citam que as propriedades da cinza variam de acordo da temperatura de combustão, espécie da madeira e tecnologia de combustão utilizada.

As cinzas de madeira apresentam, essencialmente, em sua composição química os elementos CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (UDOEYO *et al.*, 2006). Bennack (2016) faz um apanhado da composição química das cinzas utilizadas nas pesquisas de diversos autores.

Tabela 3 - Composição química de cinzas de madeira.

Autores	Compostos químicos							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Elinwa e Mahmood	67,20	4,09	2,26	9,98	5,80	-	0,08	0,48
Udoeyo e Dashibil	78,92	0,89	0,85	0,58	0,96	-	0,43	-
Elinwa e Ejeh	67,20	4,09	2,26	9,98	5,80	-	0,08	0,48
Abdullahi	31,80	28,0	2,34	10,53	9,32	0,38	6,50	-
Cheah e Ramli	28,00	4,10	2,50	39,00	10,00	7,40	1,00	3,90

Fonte: Elinwa e Mahmood, 2002; Udoeyo e Dashibil, 2002; Elinwa e Ejeh, 2004; Abdullahi, 2006; Cheah e Ramli, 2012, *apud* Bennack 2016.

A tabela acima expõe a grande variabilidade de composições a qual o resíduo está sujeito, portanto, uma análise química é de grande importância se a pesquisa pretende utilizá-lo como material pozolânico (NAIK e KRAUS, 2001). Segundo a ABNT/NBR 12653 (2014) para o resíduo ser considerado pozolânico, deve apresentar uma quantidade maior ou igual a 70% do somatório dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Siddique (2012) observou um aumento na capacidade de absorção de água do concreto conforme o teor de cinzas aumentava, porém, a resistência a compressão, tração e flexão diminuía ao mesmo passo. Contudo, se a cinza apresenta propriedades pozolânicas, a resistência apresenta um aumento conforme a idade, validando seu uso em peças estruturais.

Já Udoeyo *et al.* (2006) cita que o uso de cinzas de madeira na dosagem do concreto, diminui a trabalhabilidade e reduz o valor da resistência à compressão consideravelmente a medida que o teor de cinza aumenta. O mesmo autor justifica

que a queda da resistência se dá pelo fato de as cinzas atuarem essencialmente como material de enchimento, filler, e não como material de propriedades cimentícias ou pozolânicas.

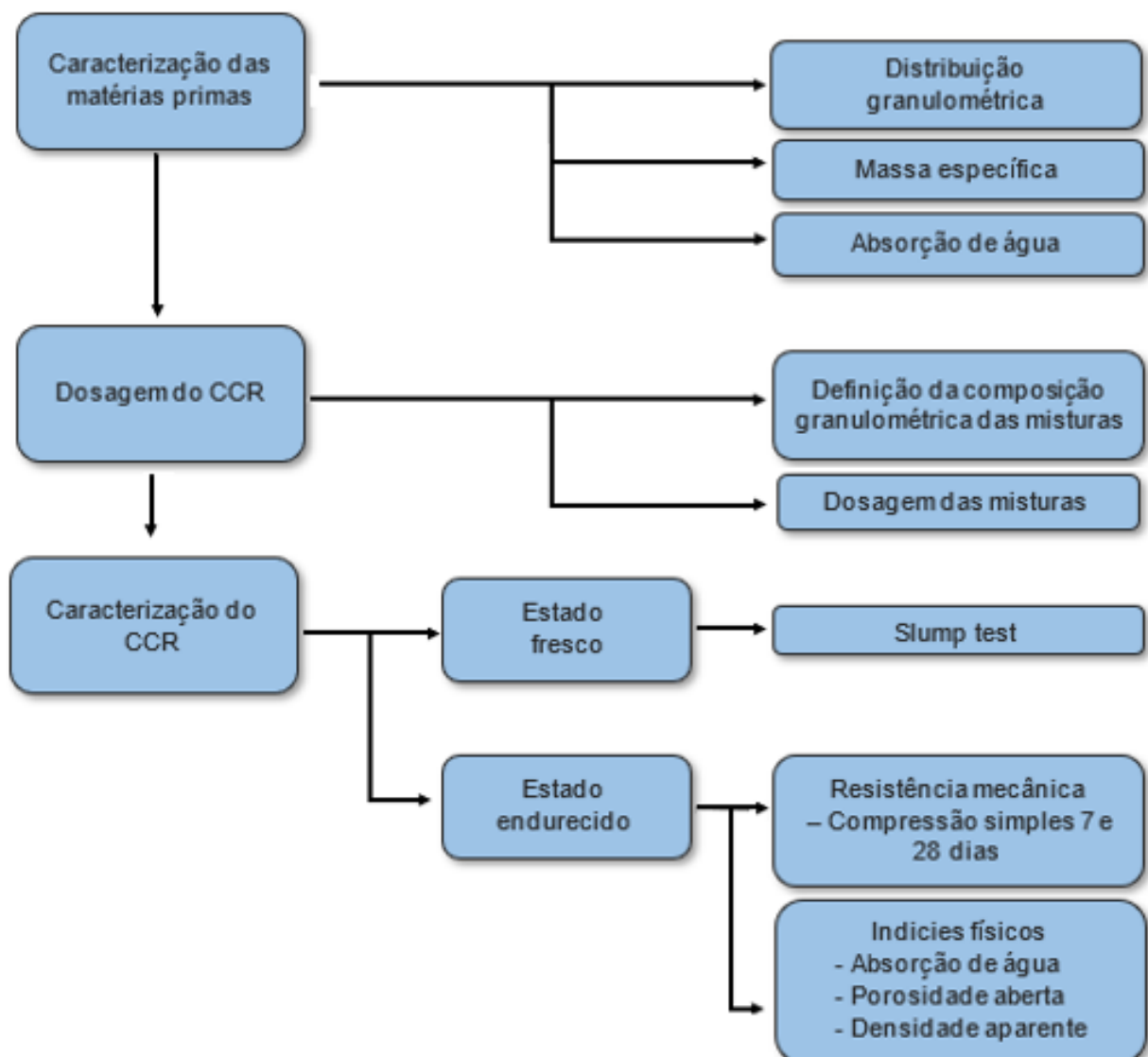
A pesquisa de Bardini (2008) buscou verificar a viabilidade técnica da adição de cinza de madeira como filler em obras de pavimentação asfáltica. Apesar de apresentar uma piora nas propriedades mecânicas da mistura, os valores obtidos, em sua maioria, situaram-se acima dos limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas, o que estimula novas pesquisas, visto o potencial de mitigar os problemas ambientais representados pelas cinzas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para a execução da presente pesquisa. A metodologia adotada foi baseada na literatura e nos objetivos do estudo. A Figura 7 apresenta o fluxograma de atividades.

Figura 7 - Etapas para execução do trabalho.



Fonte: Autor, 2018.

O principal objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade técnica do uso de cinza de madeira como substituta da areia na dosagem do CCR a ser utilizado como

sub-base, tendo como propósito oferecer um fim mais nobre ao resíduo, que hoje é primordialmente descartado em aterros, gerando danos expressivos ao meio ambiente.

O programa experimental visa desenvolver um estudo laboratorial a fim de investigar o efeito da adição de cinza de madeira em substituição parcial a areia nas propriedades mecânicas do CCR.

## 3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados na confecção do CCR e do CCP são os mesmos: água, areia, brita, cimento e eventuais adições, que nesta pesquisa refere-se a cinza de madeira. Os materiais foram selecionados segundo critérios que validem seu uso à produção de concreto e sua disponibilidade na região do município de Joinville – SC.

### 3.2.1 Água

O CCR é muito mais sensível as variações de água que os CCP, a falta de água aumenta a chance de segregação, acarretando problemas de acabamento superficial, enquanto o excesso torna a mistura muito plástica, o que dificulta a compactação (PITTA e DIAZ, 1991 apud TRICHÊS e SILVA, 2005).

A água deve ser isenta de substâncias que prejudiquem a hidratação do cimento. Pressupõem-se águas potáveis como adequadas para uso (RICCI, 2007). A água utilizada na mistura foi proveniente da Companhia Águas de Joinville, responsável pelo abastecimento de água da cidade de Joinville – SC.

### 3.2.2 Cimento

Segundo a norma DNIT/056 (2013) qualquer tipo de cimento pode ser utilizado na produção do CCR, sendo que seu consumo varia de 80 kg/m<sup>3</sup> a 120 kg/m<sup>3</sup> no caso de uso em camadas de sub-base de pavimentos.

O cimento foi escolhido em função de sua disponibilidade de obtenção na região, tendo em vista que deve atender a demanda de uma possível obra e ser economicamente viável.

O cimento utilizado na produção dos corpos de prova é classificado como CP II – F 40, da marca Votoarantim. Os dados de caracterização do material foram obtidos a partir de sua classificação no Guia Básico de Utilização de Cimento Portland da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2015). Alguns destes dados são expostos na tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do cimento.

Tipo de cimento portland	Sigla	Finura		Tempos de pega		Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	Ínicio (h)	Fim (h)	Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)	
Composto	CP II - F	≤ 10	≥ 280	≥ 1	≤ 10	94 - 90	-	-	6 - 10	NBR 11 578

Fonte: adaptada de ABCP, 2002.

### 3.2.3 Agregado Graúdo

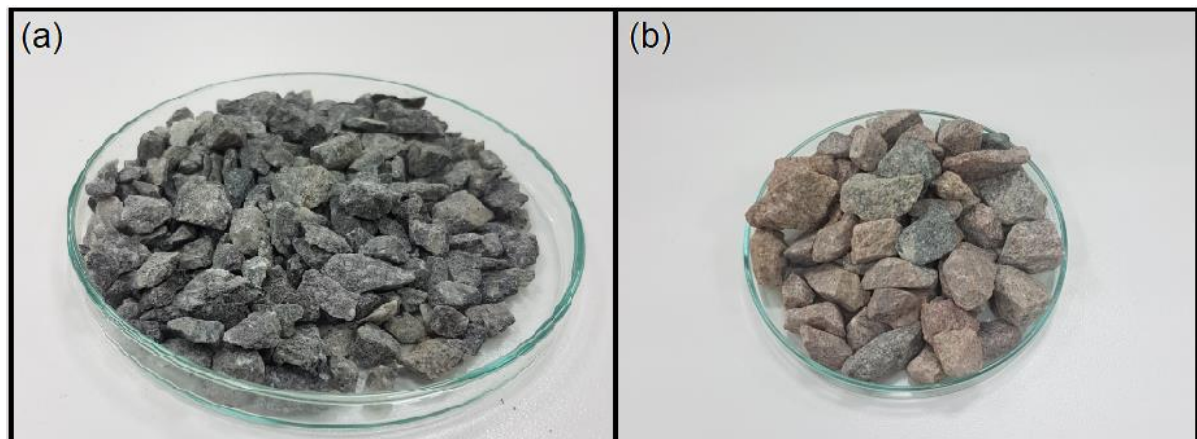
A princípio, desde que os agregados atendam as condições especificadas por norma, como teor de substância nocivas e dureza, não há restrições quanto ao seu uso na produção de CCR (ANDRADE, 1997).

Segundo a norma DNIT/056 (2013), para aplicação do CCR como sub-base de pavimentos rígidos, o diâmetro máximo característico (DMC) do agregado não deve exceder 1/3 da espessura da camada ou 32 mm. Contudo, vem sendo notada uma dificuldade quanto a compactação e posterior regularização da superfície de CCR produzidos com agregados de DMC de 32 mm, portanto, recomenda-se a utilização de agregados com DMC de 19 mm (RICCI, 2007).

A fim de enquadrar a composição granulométrica utilizada para a produção do CCR nos limites estabelecidos pelas experiências nacionais e internacionais, utilizou-se brita 0 (9,5 mm) e brita 1 (19 mm), provenientes da região da cidade de Joinville – SC.



Figura 8 - Agregados graúdos utilizados na mistura; Brita 0 (a); Brita 1 (b).



Fonte: Autor ,2018.

### 3.2.4 Agregado Miúdo

Da mesma forma que os agregados graúdos, os agregados miúdos não têm restrições quanto ao seu uso na produção do CCR, desde que atendam as condições mínimas especificadas por norma. A areia utilizada no estudo foi escolhida devido a facilidade de obtenção e apresentar características satisfatórias, é natural da região de Joinville – SC.

Figura 9 - Agregado miúdo utilizado na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.5 Cinza de Madeira

As cinzas utilizadas na presente pesquisa são originadas de uma indústria de painéis e produtos de madeira, situada no Paraná. São oriundas da combustão incompleta da madeira de Pinus (casca, galhos, folhas e subprodutos madeireiros resultantes do processo de beneficiamento da madeira). A figura 10 mostra o aspecto da cinza de madeira utilizada na pesquisa.

Figura 10 - Cinza de madeira utilizada na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

A cinza em questão é a mesma utilizada por Bennack (2016). Em seu estudo, autora fez a análise química do resíduo com o propósito de descobrir se o mesmo apresenta um comportamento pozolânico. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Análise Química da cinza de madeira.

<b>Compostos químicos</b>									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
10,56	3,76	3,52	2,94	1,39	0,24	0,57	1,14	46,19	0,55

Fonte: Adaptado de Bennack, 2016.

Segundo a ABNT/NBR 12653, para o material ser considerado pozolânico, deve apresentar uma quantidade maior igual a 70% no somatório dos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o que não acontece para este resíduo.

### 3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Conforme apresentado no início deste capítulo a metodologia da pesquisa é dividida em três etapas principais. Na primeira se encontram os ensaios preliminares de caracterização física das matérias primas. Na segunda etapa foi realizado o método de dosagem do CCR, baseado nos estudos de Ricci (2007) e Silva (2006). A última etapa refere-se ao estudo das propriedades, em estado fresco e endurecido, do CCR.

#### 3.3.1 Caracterização das matérias primas

Esta seção apresenta os procedimentos para a realização dos ensaios referentes a caracterização das matérias primas utilizadas na produção do CCR.

##### 3.3.1.1 Distribuição granulométrica

A realização do ensaio de granulometria teve como principal objetivo contemplar o processo de produção industrial do agregado. Isto porque o procedimento de britagem diverge e britas oriundas de diferentes pedreiras podem ter composições granulométricas distintas mesmo tendo a mesma classificação. Diante disto, não é sensato utilizar, de forma literal, composições granulométricas já consagradas de estudos passados.

O ensaio de granulometria foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC – Joinville, conforme as diretrizes estabelecidas pela ANBT/NBR NM 248 (2003).

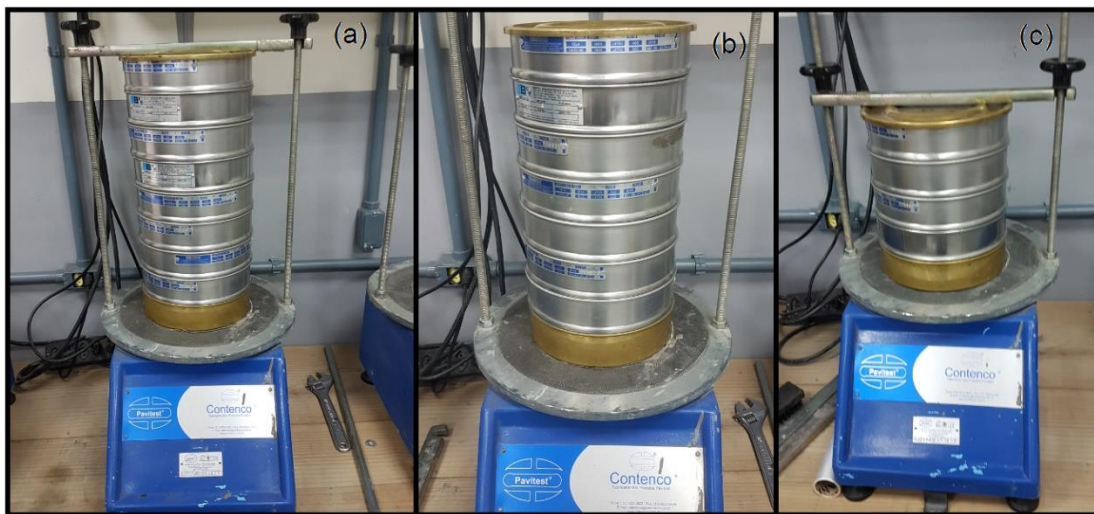
Foram separadas duas amostras de 300 gramas (g) para a areia e cinza de madeira, 1000 g para brita 0 e 5000 g para brita 1, secas em estufa por 24 horas. A massa por amostra foi definida em função do DMC do agregado. Foi realizado o

quarteamento dos materiais segundo a ABNT/NBR NM 27 (2000), com a finalidade de retirar amostras representativas do material a serem utilizadas durante o estudo.

As peneiras, previamente limpas, foram encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, de modo a formar um único conjunto de peneiras, provido de um fundo e uma tampa.

O conjunto de peneiras utilizados para realização do ensaio da brita 1 foi composto pelas peneiras de 19 mm, 12,5 mm, 9,5mm e 6,3mm, para a brita 0 e areia utilizou-se peneiras de 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,3 mm e 0,15 mm e para cinza de madeira foram empregadas peneiras de 4,75mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, 0,074 mm e 0,063 mm. A figura 11 mostra os conjuntos de peneiras utilizados no ensaio.

Figura 11 - Conjunto de peneiras utilizadas; Cinza de Madeira (a); Brita 0 e areia (b); Brita 1 (c).



Fonte: Autor, 2018.

Cada amostra foi depositada sobre a peneira superior do conjunto e agitada mecanicamente por 10 minutos. Em seguida, destacou-se a peneira superior e realizou-se agitação manual por 1 minuto, até que a massa de material passante pela peneira fosse inferior a 1% da massa de material retido. O material passante foi adicionado a próxima peneira da pilha e o processo foi repetido com as demais peneiras do conjunto. Foi determinado a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo e, a partir destes dados foram elaboradas as curvas granulométricas dos materiais.

O módulo de finura e DMC foram determinados a partir da ABNT/NBR 7211 (2009). O DMC corresponde a abertura nominal, em mm, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura é obtido da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividido por 100. Quanto menor o valor do módulo de finura, mais fina será a granulometria do material analisado.

### 3.3.1.2 Massa específica e absorção de água do agregado miúdo

Massa específica é a relação entre a massa do agregado seco em estufa e seu volume, excluindo os poros permeáveis à água (ABNT/NBR 9776, 1987). Para determinação da massa específica do agregado miúdo foram utilizadas as diretrizes presentes nas normas ABNT/NBR 9776 (1987) e DNER-ME 194 (1998). O ensaio é realizado, conforme prevê a norma, utilizando o frasco de Chapman.

Figura 12 - Frasco de Chapman.



Fonte: Autor, 2018.

Inicialmente, o frasco é preenchido até a marca dos 200 cm<sup>3</sup>, localizada no estrangulamento existente entre os dois bulbos, e mantido em repouso até que a água aderida às faces internas escorram totalmente. Em seguida foi introduzido cuidadosamente ao frasco 500 g de areia, previamente seca em estufa, a qual deve ser devidamente agitada a fim de eliminar as bolhas de ar. Com as faces internas

completamente secas e sem grãos aderidos, é feita a leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco, que indica o volume em cm<sup>3</sup> ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo. O ensaio foi repetido duas vezes consecutivas, sendo que para o resultado ser válido a massa específica obtida em cada ensaio não pode diferir entre si mais de 0,05 g/cm<sup>3</sup>.

A massa específica do agregado miúdo é calculada a partir da equação (2).

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

$\gamma$  - Massa específica do agregado.

$L$  - Leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água/pó-de-pedra).

A determinação da absorção de água do agregado miúdo foi feita reproduzindo o método realizado por Bennack (2016). Utilizando um molde metálico prismático com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, foram adicionadas pequenas porções de areia, compactadas com um auxílio de um soquete pequeno, até o limite superior do molde, a fim de obter-se o volume do agregado miúdo.

Em um frasco de Chapman, foi adicionado 300 cm<sup>3</sup> de água e, em seguida, introduzida a areia que teve o volume determinado anteriormente com o auxílio de um funil. Após 5 dias, visando garantir a total absorção de água pelo agregado, foi feita a leitura do frasco.

A determinação da absorção de água do agregado miúdo se deu a partir das equações (3) e (4).

$$\text{Água absorvida} = (V_{ag} - V_f) \text{ [cm}^3\text{]} \quad (3)$$

Onde:

$V_{ag}$  – Soma entre o volume inicial de água (200 cm<sup>3</sup>) e o volume do molde (256 cm<sup>3</sup>).

$V_f$  – Volume aferido no frasco de Chapman após 5 dias, em cm<sup>3</sup>.

$$Absorção = \frac{\text{Água absorvida}}{V_{ag}} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

### 3.3.1.3 Massa específica e absorção de água do agregado graúdo

A determinação da massa específica e absorção de água do agregado graúdo foi realizada conforme as diretrizes da ABNT/NBR NM 53 (2009), sendo que a amostragem foi realizada de acordo com a mesma norma em conjunto com a ABNT/NBR 26 (2009) e ABNT/NBR NM 27 (2001).

Uma amostra de 2 kg de brita 0 e 3 kg de brita 1 foram submersas em água por um período de 24 h. Em seguida as amostras foram retiradas e secas superficialmente por um pano absorvente, até que toda água visível fosse eliminada. Imediatamente após serem enxugadas, o material foi pesado, obtendo-se a massa saturada com superfície seca (**ms**) das amostras. O material foi depositado em um cesto vazado submerso em água e então pesado, registrando-se a massa do agregado em água (**ma**). Posteriormente, cada uma das amostras foi seca até massa constante em estufa e, então, pesada novamente, obtendo-se a massa do agregado seco (**m**).

A massa específica dos agregados graúdos na condição saturada de superfície seca foi obtida a partir equação (5).

$$ds = \frac{ms}{ms - ma} [\text{g/cm}^3] \quad (5)$$

A massa específica do agregado seco foi obtida utilizando-se a equação (6).

$$d = \frac{m}{ms - ma} [\text{g/cm}^3] \quad (6)$$

A absorção de água foi calculada segundo a equação (7)

$$A = \frac{ms - m}{m} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

### 3.3.2 Dosagem do CCR

A metodologia de dosagem do concreto, independente do seu tipo, visa compatibilizar os materiais e equipamentos disponíveis à sua produção de maneira a desenvolver uma composição que atenda as especificações de desempenho preconizadas, da forma mais econômica (PINTO 2010).

O CCR, após a cura, apresenta características semelhantes ao CCP, contudo, existe uma sensível diferença em seus métodos de dosagem, uma vez que CCR tem sua dosagem regida em função de seu índice de vazios (SACHET, 2012).

Em concretos plásticos como o CCP, os vazios existentes na mistura são ocupados, em maior parte, pela pasta de cimento. Para estes concretos, a resistência mecânica do material é maior para menores consumos de água.

Em concretos secos, como o CCR, isso não ocorre, visto que o material apresenta significativos poros em sua composição. A metodologia de dosagem do CCR busca uma mistura que propicie o menor volume de vazios possível (RICCI, 2007).

Um conceito fundamental à dosagem do CCR é a umidade ótima, que corresponde a massa específica aparente seca máxima, obtida por meio do ensaio de compactação Proctor (SILVA, 2006).

O baixo consumo de ligante hidráulico se dá pelo alto intertravamento das partículas granulares e baixo índice de vazios, oriundas de um arranjo granulométrico contínuo, bem graduado (PINTO, 2010). A composição granulométrica deve ser desenvolvida de forma a atingir todas as especificações de desempenho desejadas pelo material (DNIT, 2004).

#### 3.3.2.1 Definição da composição granulométrica das misturas

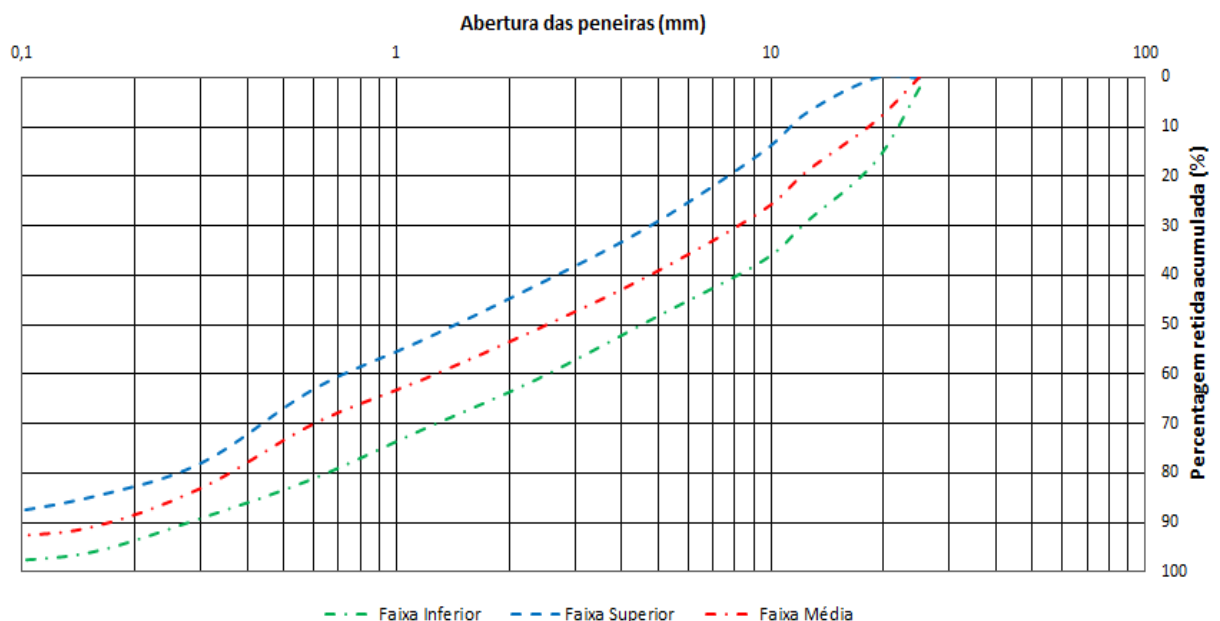
A granulometria foi definida a fim de obter-se o menor índice de vazios possível, tendo em vista que para o CCR é um fator determinante para o bom comportamento mecânico da mistura. Porcentagens baixas de vazios também diminuem o consumo de cimento, gerando redução de custos de uma eventual obra, uma vez que o cimento é o constituinte mais caro do CCR.



Para utilização do CCR como camada de sub-base, não existe uma obrigatoriedade de se utilizar uma faixa granulométrica específica, como é o caso de bases puramente granulares ou misturas asfálticas. O CCR permite uma flexibilidade na definição de sua composição granulométrica, desde que o material atinja os requisitos mínimos de utilização (SACHET, 2012). Contudo, recomenda-se o uso de faixas granulométricas já consagradas de estudos passados, pois estas garantem à mistura um bom desempenho.

Procurou-se desenvolver uma composição granulométrica para a dosagem do CCR que estivesse compreendida dentro dos intervalos estabelecidos por Pittman e Ragan (1998), apresentada no gráfico 4, utilizada também nas pesquisas propostas por Abreu (2002) da eficiência do CCR de alta resistência para pavimentação, Ricci (2007) da utilização do resíduo de construção e demolição na composição do CCR, Pinto (2010) do uso de escória granular de alto forno como adição ao CCR e Sachet (2012) da incorporação de fresados na mistura do CCR para base de pavimentos.

Gráfico 4 - Faixa granulométrica de Pittman e Ragan.



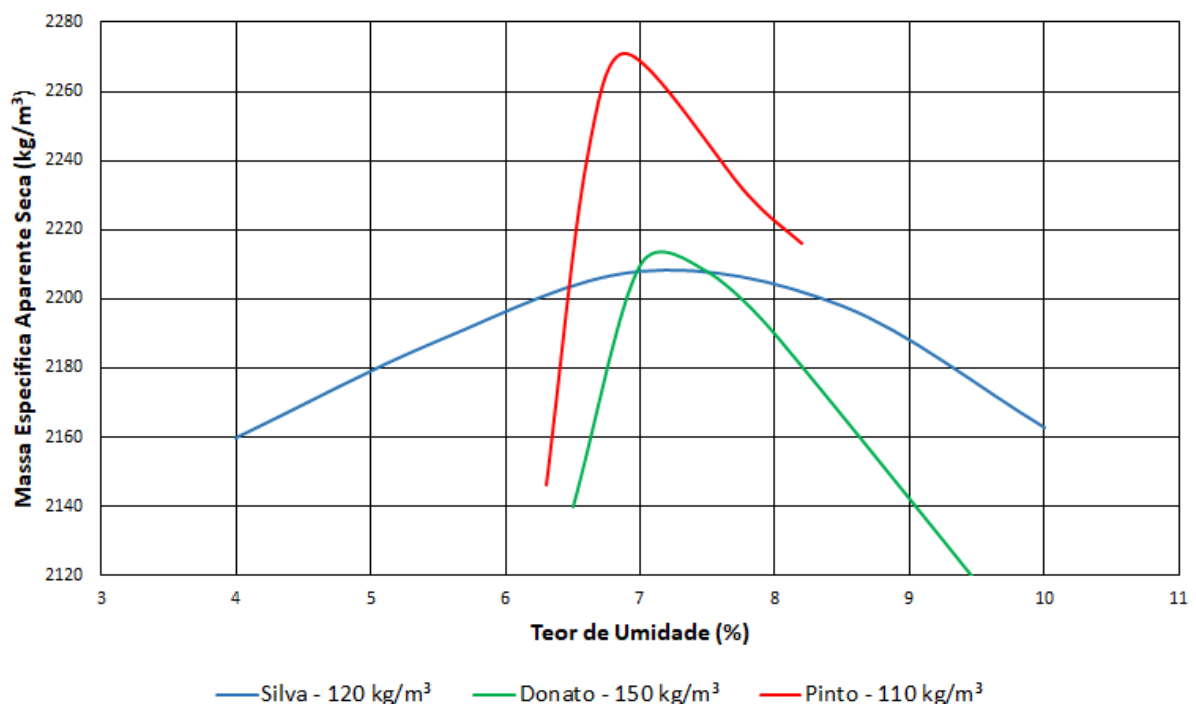
Fonte: Adaptado de Pittman e Ragan, 1998.

### 3.3.2.2 Determinação da umidade ótima

A definição da umidade ótima se dá a partir da análise da curva de compactação obtida por meio do ensaio de compactação Proctor, que relaciona a umidade com a massa específica aparente seca da mistura. É um parâmetro de grande importância na dosagem, visto que está diretamente relacionado com o índice de vazios.

Para definição da umidade ótima utilizou-se as curvas de compactação obtidas nos estudos de Donato (2003), Silva (2006) e Pinto (2010), os estudos em questão apresentam uma composição granulométrica semelhante à proposta pela presente pesquisa (brita 1, brita 0 e areia). O gráfico 5 mostra a curva de compactação obtida pelos autores e o consumo de cimento em  $\text{kg}/\text{m}^3$  utilizado em cada pesquisa.

Gráfico 5 - Curvas de compactação.



Fonte: Adaptado de Donato, 2003; Silva, 2006 e Pinto 2010.

A tabela 6 apresenta a umidade ótima, obtida através do ensaio de compactação Proctor, para as misturas propostas por Donato (2003), Silva (2006) e Pinto (2010).

Tabela 6 – Umidade ótima obtida pelos autores.

Autor	Umidade ótima (%)
Donato (2003)	7,1
Silva (2006)	6,9
Pinto (2010)	7,05

Fonte: Adaptado de Donato, 2003; Silva, 2006 e Pinto 2010.

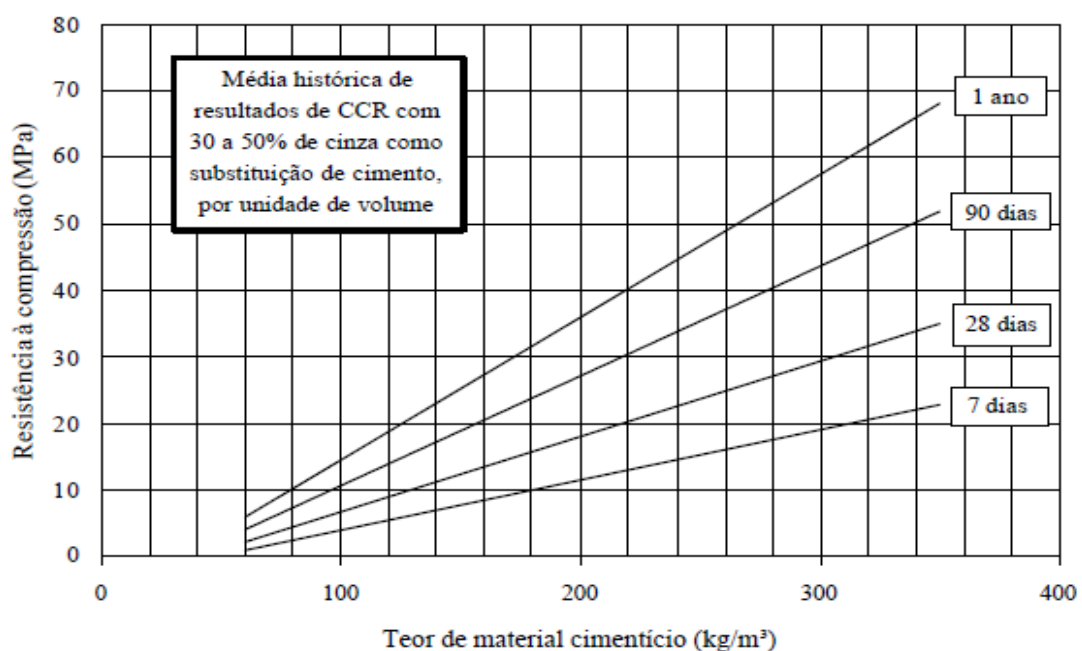
A partir destes dados, foi estabelecido a umidade ótima de 7% para realização da presente pesquisa.

### 3.3.2.3 Dosagem das misturas

A dosagem das misturas de CCR foi baseada na equação (1) do item 2.2.5, conforme recomenda Trichês (1993).

Para utilização da fórmula, é necessário fixar-se o consumo de cimento da mistura. Para tal, utilizou-se o gráfico 6, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 2000), onde se relaciona a resistência à compressão com o teor de material cimentício.

Gráfico 6 - Teor de cimento versus resistência a compressão.



Fonte: Donato, 2003 adaptado de USACE, 2000.

A norma DNIT/056 (2013) determina que para aplicação do CCR como camada de sub-base, a resistência à compressão aos 7 dias de cura deve atingir ao menos 5 MPa. A fim de atender o critério da norma, foi definido com o auxílio do gráfico 6 um consumo de cimento de 120 kg/m<sup>3</sup>.

Com o consumo de cimento fixado e a umidade ótima estabelecida é possível dar continuidade ao processo de dosagem, utilizando-se a equação (1).

#### 3.3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

Definido o traço das três formulações, procedeu-se a moldagem dos CP. Os CP foram produzidos no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville.

O concreto foi produzido com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 120 litros. A sequência de colocação dos materiais na betoneira foi baseada na utilizada pela pesquisa de Silva (2006), segundo os seguintes passos:

- 100% das frações do agregado graúdo;
- Cerca de 70% da água de amassamento;
- 100% do cimento;
- 100% do agregado miúdo e;
- O restante da água

O tempo de mistura após a colocação do agregado graúdo e da água foi de 40 a 50 segundos, visando a total lubrificação dos grãos, este intervalo de tempo também foi adotado após a colocação do cimento. No final do processo, foi colocado todo agregado miúdo e o restante da água, onde aguardou-se cerca de 3 minutos para completa homogeneização da mistura. A cinza de madeira, para as formulações onde houve adição da mesma, foi adicionada logo após o agregado miúdo. A figura 13 mostra a betoneira utilizada na confecção dos CP.

Figura 13 - Betoneira utilizada na confecção dos CP.



Fonte: Autor, 2018.

A moldagem dos CP foi realizada conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT/NBR 5738 (1994), utilizando moldes cilíndricos de 100 mm x 200 mm, sendo confeccionados oito exemplares por formulação.

Utilizou-se da energia normal de compactação onde os CP foram moldados em três camadas, compactadas com o auxílio do soquete de Proctor modificado (4,5 kg) com uma altura de queda de 45 cm, cada uma com 21 golpes.

Assim que concluída a moldagem, conforme estabelece a norma, os CP foram conservados por 24 horas nas formas cobertos por plástico, para que mantivessem sua umidade até serem desmoldados. Imediatamente após o desmolde, os CP foram armazenados em um tanque de água saturada em cal, não corrente, até a realização dos ensaios de compressão simples.

### **3.3.3 Comportamento Mecânico do CCR**

A fim de avaliar o desempenho mecânico das formulações de CCR foram realizados ensaios, no estado fresco e endurecido, para as misturas propostas. A metodologia adotada para a realização de cada ensaio será apresentada nos itens a seguir.

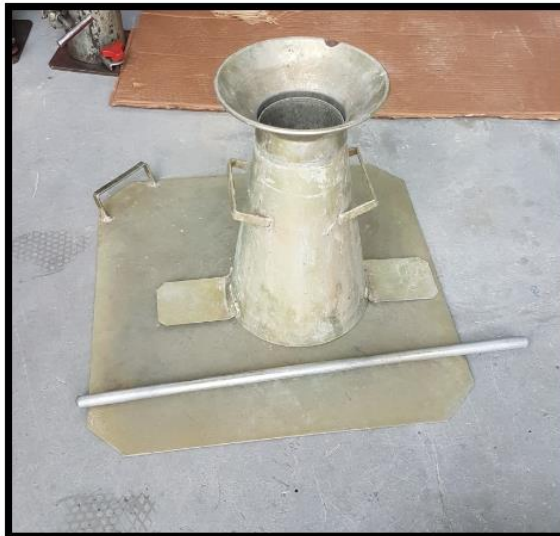
### 3.3.3.1 Ensaio no estado fresco

#### 3.3.3.1.1 Consistência

O ensaio de consistência ou *slump test*, foi realizado para cada uma das formulações de CCR produzidas, seguindo as especificações da ABNT/NBR NM 67 (1998).

Em um primeiro momento, o molde e a placa foram limpos e umedecidos e dispostos conforme ilustra a figura 14. Após a finalização da mistura na betoneira, preencheu-se o cone em três camadas, compactadas com 21 golpes cada. A operação de retirada do molde foi feita de maneira cuidadosa na direção vertical, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. A operação completa, desde o início do preenchimento do molde até sua retirada ocorreu dentro do limite de 150 segundos estabelecido pela norma.

Figura 14 - Equipamentos utilizados no ensaio de consistência.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.3.3.2 Ensaio no estado endurecido

#### 3.3.3.2.1 Ensaio de resistência à compressão simples

A resistência à compressão axial foi avaliada nas idades de 14 e 28 dias, sendo que foram moldados 4 CP por formulação para cada idade, totalizando 24 CP. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção da Universidade Anhanguera – Joinville, de acordo com a ABNT/NBR 5739 (2007). A prensa hidráulica utilizada no ensaio é exibida na figura 15.

Figura 15 – Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: Autor, 2018.

A resistência a compressão foi calculada através da equação (8). Tendo em vista que os CP foram retificados, a relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) de alguns corpos de prova foi menor que 1,94, e se fez necessária as correções descritas na tabela 11, conforme estabelece a norma.

$$F_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (8)$$

Onde:

**F<sub>c</sub>** – Resistência a compressão em MPa;

**F** – Força máxima alcançada em Newtons;

**D** – Diâmetro dos CP em mm.

Tabela 7 - Fatores de correção para resistência à compressão.

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

Fonte: ABNT, 2007

### 3.3.3.2.2 Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Os ensaios de caracterização física do CCR (densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água) foram realizados aos 28 dias, com o intuito de correlacionar-se os resultados obtidos com a resistência a compressão para cada formulação. Para tal, considerou-se o princípio de Arquimedes que consiste em:

- Coletar e secar (em uma temperatura de aproximadamente  $103\pm 1$  C° durante 24 horas) os pedaços provenientes do rompimento dos CP e, em seguida, realizar sua pesagem para obtenção da massa seca (**Ms**);
- Imergir os pedaços em água por 72 horas e então registrar a massa imersa em água (**Mi**);
- Pesar a amostra após secagem de sua superfície, obtendo-se a massa saturada com superfície seca (**Msss**).

Com base nas medições realizadas, foi possível determinar as propriedades físicas das formulações utilizando-se as equações 9, 10 e 11:

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (9)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{M_s}{M_{ss} - M_i} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (10)$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_{ss} - M_i} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (11)$$



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

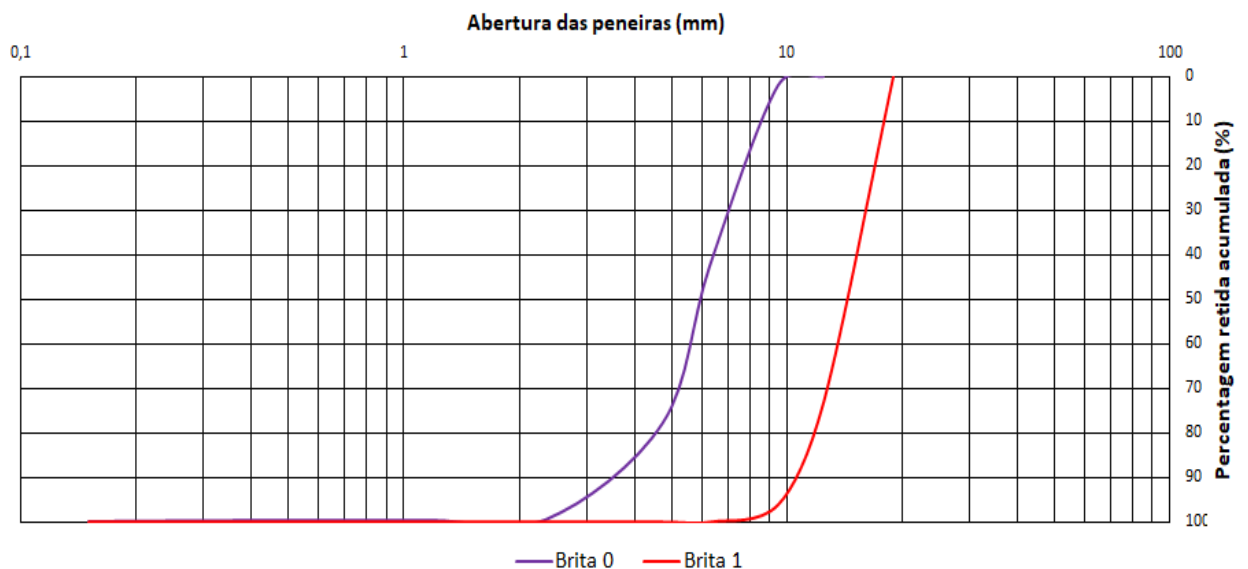
No presente capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados relativos à caracterização das matérias primas utilizadas e dos ensaios nos estados frescos e endurecidos no CCR, bem como o processo de dosagem do mesmo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

#### 4.1.1 Agregado Graúdo

O gráfico 7 apresenta a curva granulométrica, obtida por meio dos ensaios de granulometria dos agregados graúdos. Analisando o gráfico é possível notar que a granulometria da brita 1, com um diâmetro máximo de 19,5 mm e 96% de massa retida na peneira de 9,5 mm, e da brita 0, com diâmetro máximo de 9,5 mm e 80% de massa retida na peneira de 4,8 mm, atende aos limites estabelecidos pela ABNT/NBR 7211 (2009).

Gráfico 7 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos.



Fonte: Autor, 2018.

A absorção de água, massa específica do agregado seco e massa específica do agregado saturado com superfície seca foi definida conforme o item 3.3.1.3. O processo de realização do ensaio é ilustrado na figura 16.

Figura 16 - Pesagem do agregado saturado com superfície seca (a); Pesagem do agregado em água (b); Pesagem do agregado seco em estufa (c).



Fonte: Autor, 2018.

A tabela 8 apresenta os dados de caracterização dos agregados graúdos, oriundos dos ensaios de granulometria, determinação da massa específica e absorção de água.

Tabela 8 - Caracterização dos agregados graúdos.

Material	Massa específica do agregado seco	Massa específica do agregado saturado com superfície seca	Absorção de água	Diametro máximo	Módulo de finura
Brita 0	2,73 g/cm <sup>3</sup>	2,79 g/cm <sup>3</sup>	2,04%	9,5 mm	5,79
Brita 1	2,67 g/cm <sup>3</sup>	2,76 g/cm <sup>3</sup>	0,91%	19 mm	6,96

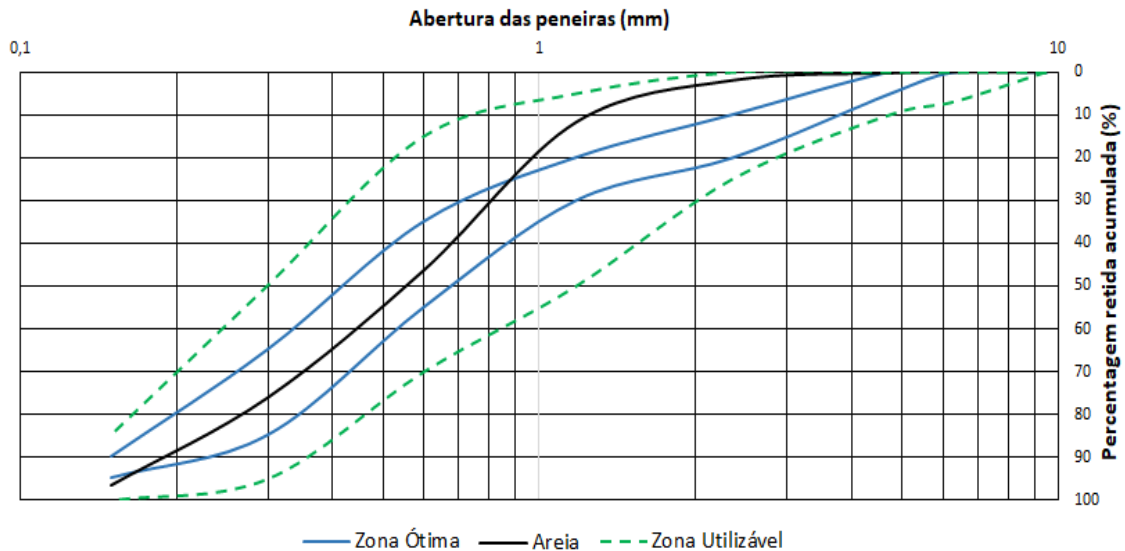
Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo, segundo a ANBT/NBR 16312-2, deve assegurar a mistura uma quantidade de finos suficiente a fim de produzir um concreto com boa compacidade e que permita um acabamento adequado, o que em alguns casos pode

não condizer com os limites de utilização especificados pela ABNT/NBR 7211. A curva granulométrica da areia utilizada na produção do CCR está apresentada no gráfico 8.

Gráfico 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor, 2018.

Pela análise do gráfico foi notado que o material atinge os limites de utilização estabelecidos pela ABNT/NBR 7211, o que garante ao material um comportamento mecânico aceitável. Segundo a mesma norma o arranjo granulométrico do material corresponde a um agregado miúdo médio.

A massa específica da areia média foi obtida através dos dizeres presentes nas normas ABNT/NBR 9776 (1987) e DNER-ME 194. A figura 17 apresenta algumas etapas do ensaio.

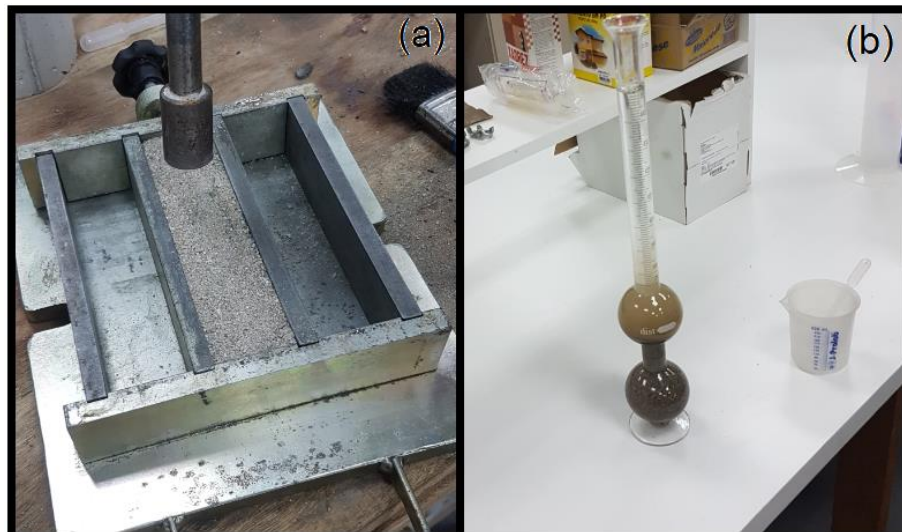
Figura 17 - Frasco com 200 cm<sup>3</sup> de água (a); Preenchimento do frasco com agregado miúdo (b).



Fonte: Autor, 2018.

Para determinar a absorção de água da areia utilizou-se o ensaio proposto por Bennack (2016). A figura 18 expõe as etapas do processo.

Figura 18 - Preenchimento do molde prismático (a); Frasco de Chapman em repouso para absorção de água (b).



Fonte: Autor, 2018.

A tabela 9 apresenta algumas características físicas da areia média provenientes dos ensaios de granulometria, determinação da massa específica e absorção de água.

Tabela 9 - Caracterização dos agregados miúdos.

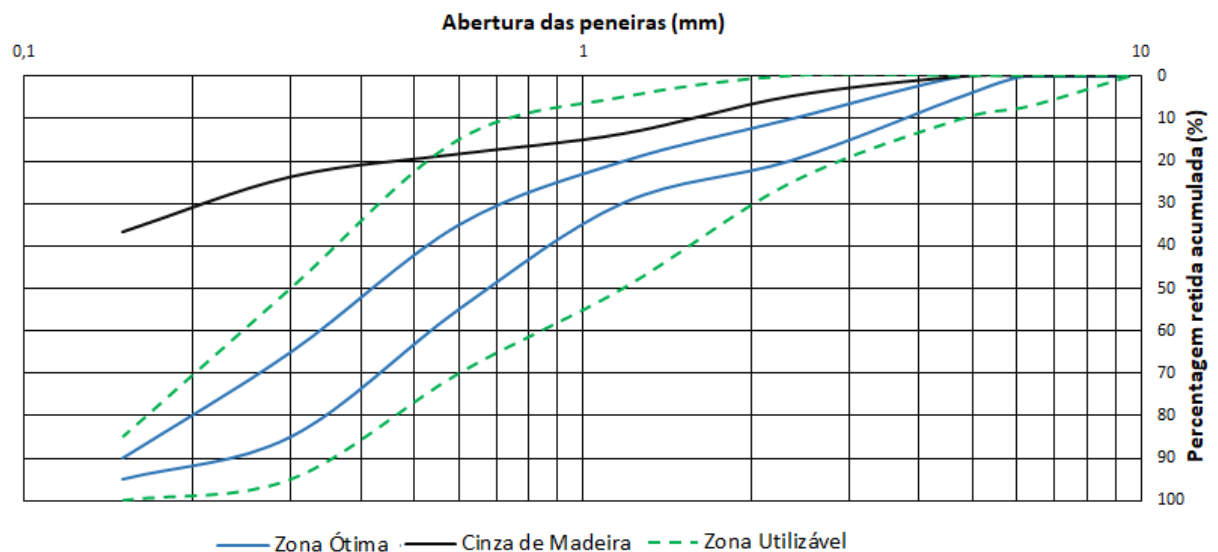
Material	Massa específica	Absorção de água	Diametro máximo	Módulo de finura
Areia média	2,60 g/cm <sup>3</sup>	17,11%	2,36	2,33

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.3 Cinza de Madeira

A fim de determinar sua granulometria, a cinza de madeira foi considerada como um agregado miúdo e ensaiada como especifica a norma ABNT/NBR 7211. A curva granulométrica oriunda deste ensaio está apresentada no gráfico 9.

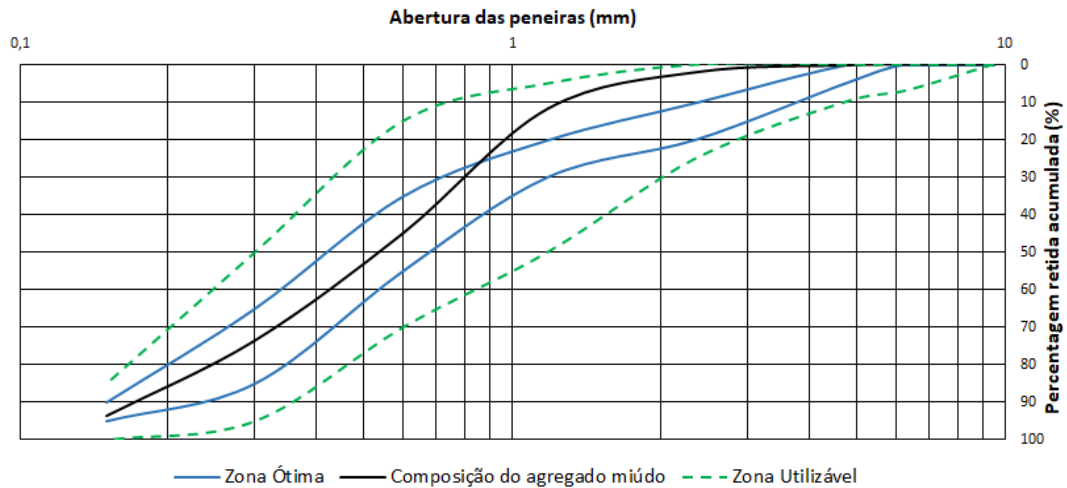
Gráfico 9 - Curva granulométrica da cinza de madeira.



Fonte: Autor, 2018.

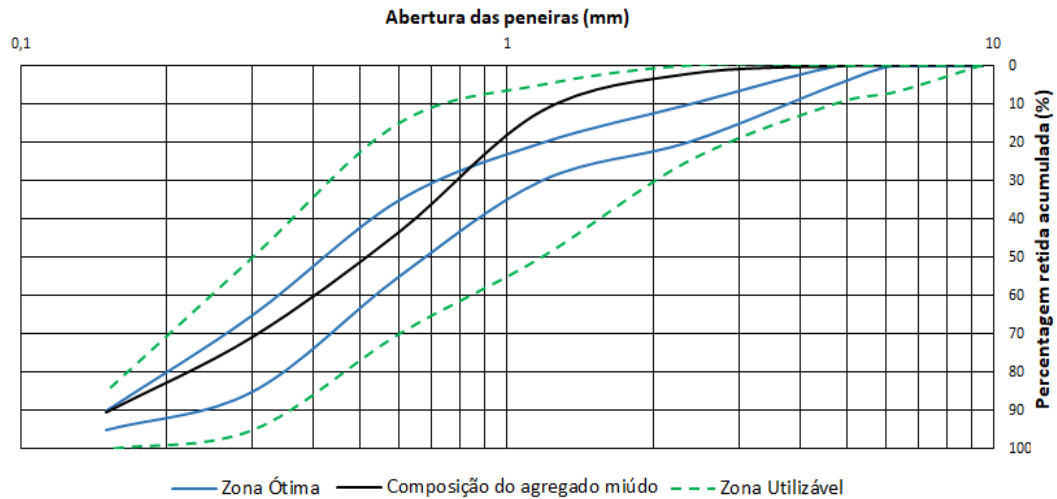
Analisando a curva granulométrica obtida é observado que não se atinge os limites mínimos de utilização estabelecidos pela ABNT/NBR 7211, contudo, tendo em vista que o material será utilizado como substituição parcial da areia em baixas quantidades, a composição granulométrica do agregado miúdo para os corpos de prova com substituição da areia por cinza de madeira nos percentuais de 5% e 10% se encontram dentro dos limites convencionados, como mostram os gráficos 10 e 11.

Gráfico 10 - Composição granulométrica do agregado miúdo com 5% de cinza de madeira.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 11 - Composição granulométrica do agregado miúdo com 10% de cinza de madeira.



Fonte: Autor, 2018.

A tabela 10 expõe as características físicas da cinza de madeira. Os índices físicos de absorção de água e massa específica foram obtidos a partir dos estudos de Bennack (2016), considerando que o resíduo em questão é proveniente da mesma empresa.

Tabela 10 - Caracterização da cinza de madeira.

Material	Massa específica	Absorção de água	Diametro máximo	Módulo de finura
Cinza de madeira	2,78 g/cm <sup>3</sup>	32,50%	2,36	0,97

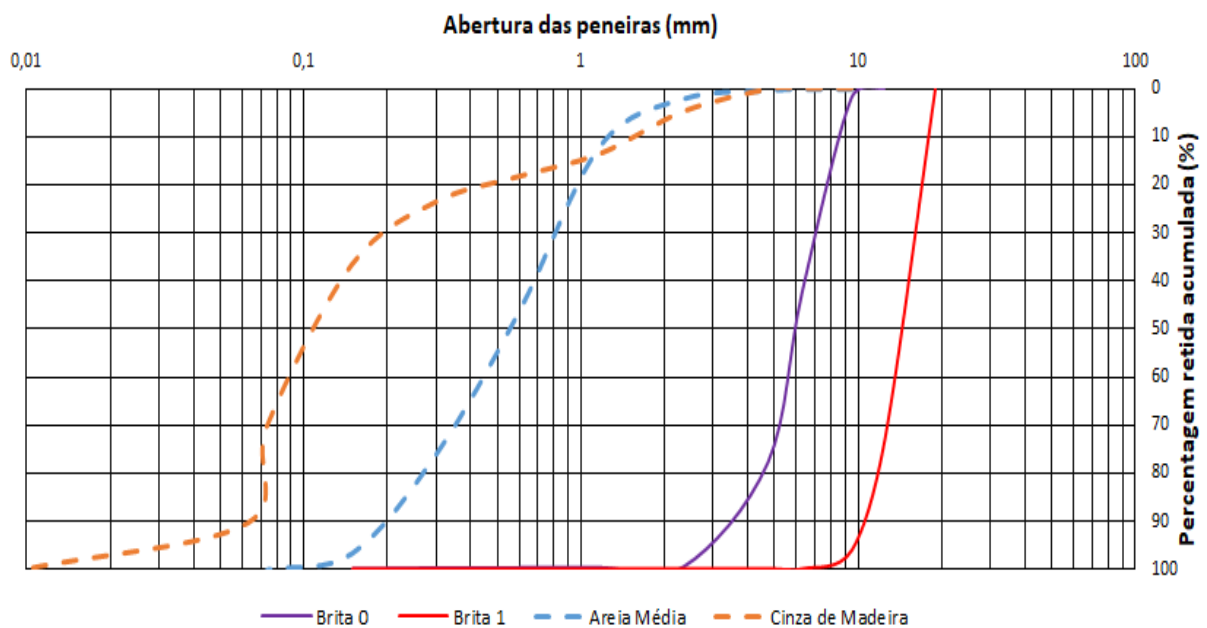
Fonte: Autor, 2018 e Bennack, 2016.

## 4.2 DOSAGEM DO CCR

### 4.2.1 Definição da composição granulométrica das misturas

Para a composição do esqueleto mineralógico do CCR utilizou-se brita 1 (19mm), brita 0 (9,5 mm), areia média (2,36 mm) e cinza de madeira (2,36 mm), esta última como substituição parcial da areia. A granulometria dos materiais está apresentada no gráfico 12.

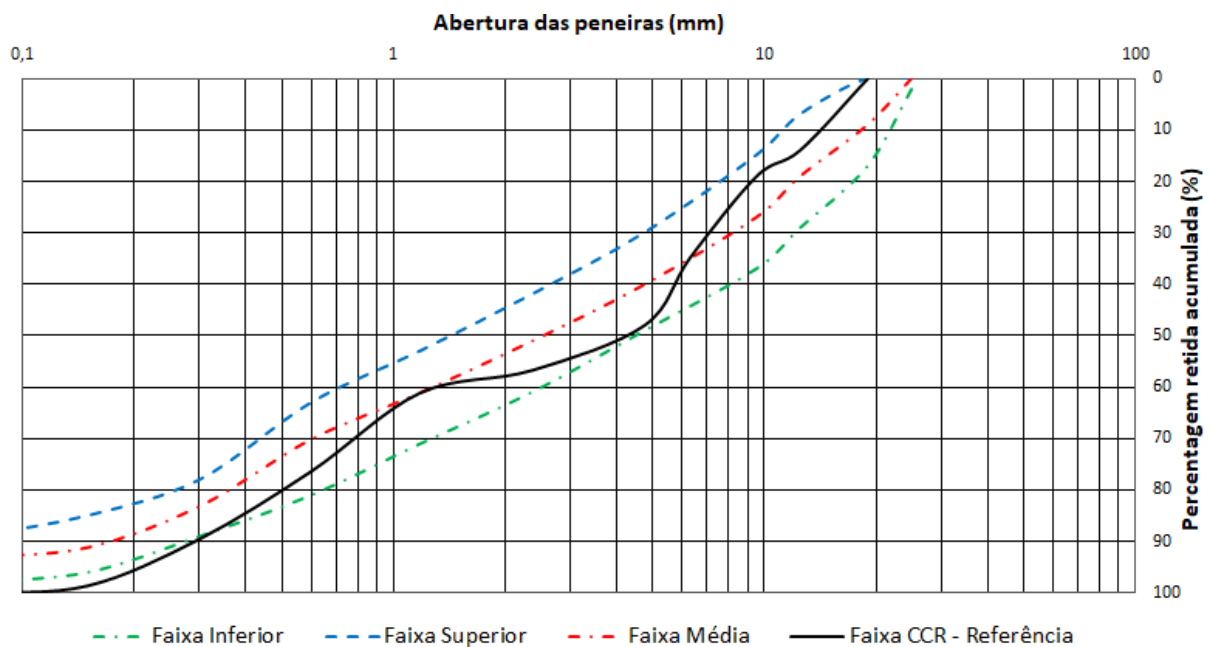
Gráfico 12 - Granulometria dos materiais utilizados na pesquisa.



Fonte: Autor, 2018.

A otimização granulométrica do CCR se deu a partir de tentativas, enquadrando a composição dos materiais granulares utilizados dentro dos limites superior e inferior da curva granulométrica proposta por Pittman e Ragan (1998). A formulação de referência, CCR – RF, apresentada no Gráfico 13, foi tomada como referência e, para as demais dosagens, foi substituída uma fração da areia por cinza de madeira em massa nos percentuais de 5% (CCR – 5C) e 10% (CCR – 10C). Os Gráficos 14 e 15 ilustram a composição granulométrica das formulações CCR – 5C e CCR – 10 C.

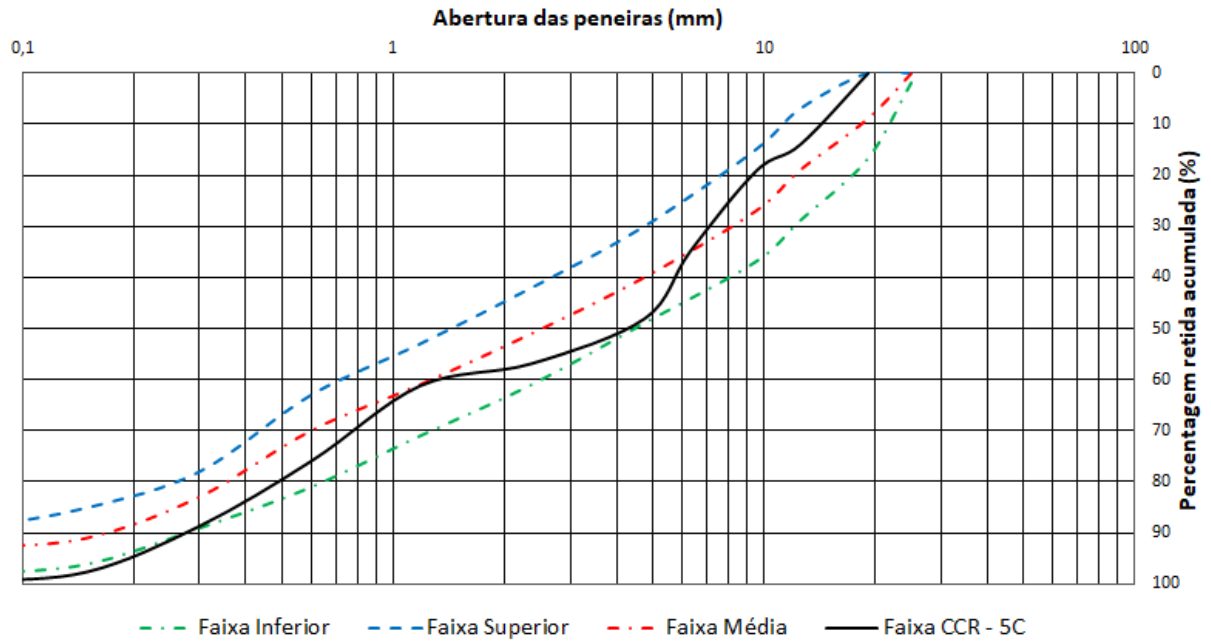
Gráfico 13 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR – RF.



Fonte: Autor, 2018.

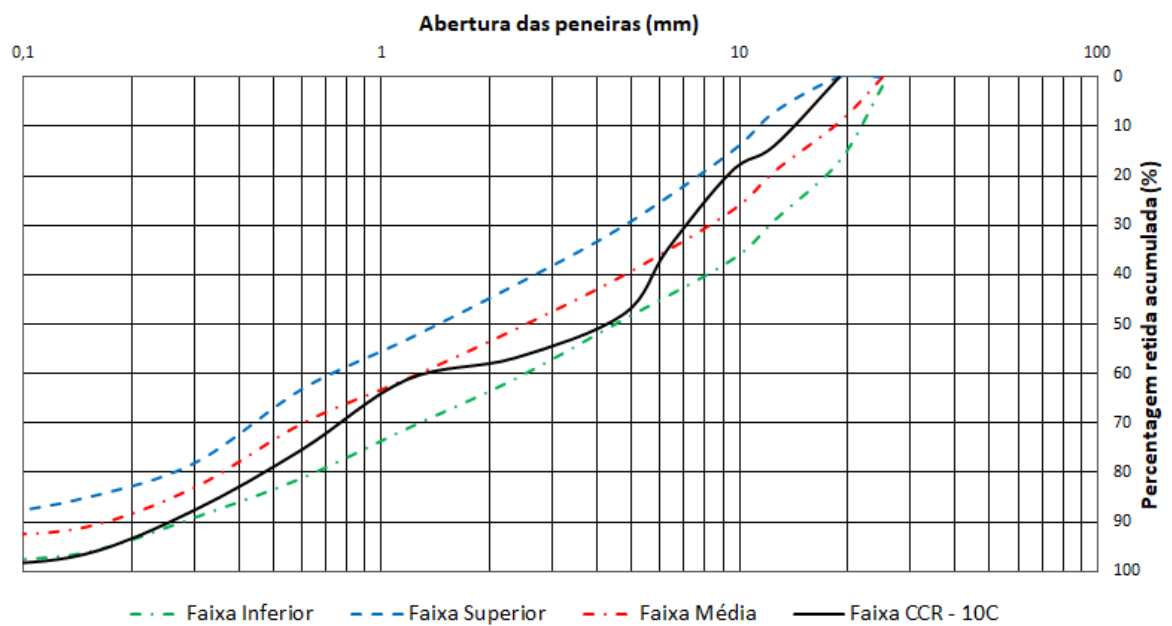


Gráfico 14 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR - 5C.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 15 - Distribuição granulométrica adotada para o CCR - 10C.



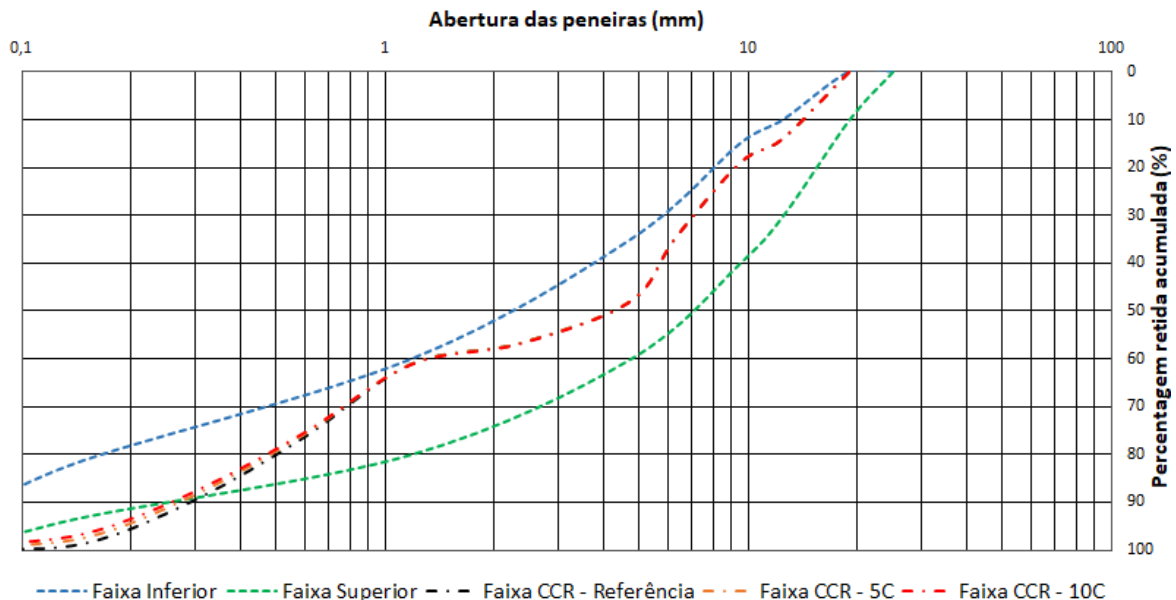
Fonte: Autor, 2018.

Tabela 11 - Composição granulométrica das misturas de CCR.

Material	Areia (%)	Brita 0 (%)	Brita 1 (%)	Cinza de Madeira (%)
CCR - RF	44	37	19	-
CCR - 5C	42,25	37	19	1,75
CCR - 10C	40,5	37	19	3,5

Fonte: Autor, 2018.

A composição granulométrica adotada também satisfaz os limites propostos por Harrington *et al.* (2010), como mostra o gráfico 14.

Gráfico 16 - Faixa granulométrica de Harrington *et al.* (2010).

Fonte: Autor, 2018.

Analisando os gráficos 13, 14, 15 e 16 nota-se que a partir da peneira de 0,3 mm a composição granulométrica das misturas de CCR encontra-se levemente abaixo dos limites estabelecidos para ambas as literaturas, o que seria facilmente resolvido incorporando-se areia fina a mistura. Contudo, como o intuito da pesquisa é a validação do uso do CCR para fins práticos, foi feita a escolha da simplificação do traço, utilizando-se apenas um tipo de agregado miúdo.

#### 4.2.2 Dosagem das misturas

A dosagem da mistura se deu conforme a equação (1), apresentada no item 2.2.5.

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

A aplicação desta equação se deu com os seguintes parâmetros:

**V** – 50 litros (Volume de vazios);

**MEc** – 2,98 kg/m<sup>3</sup> (Massa específica do cimento);

**MEag** – 2,66 kg/m<sup>3</sup> (Massa específica ponderada dos agregados);

**h** - 7,00 % (Umidade da mistura);

**m** - ? (Quantidade de agregado total por quantidade de cimento)

$$120 = \frac{1000 - 50}{\frac{1}{2,98} + \frac{m}{2,63} + \frac{7(1+m)}{100}}$$

Resolvendo a equação para “m” temos:

$$m = 16,84$$

Com o valor de “m” calculado e, utilizando composições granulométricas obtidas no item 4.2.1, tem-se as seguintes proporções de agregado para cada 1 kg de cimento:

**Brita 1 (19 mm)** – 19 % 16,68 = 7,41

**Brita 0 (9,5 mm)** – 37 % 16,68 = 6,23

**Areia (2,36 mm)** – 44 % 16,68 = 3,20

A tabela 12 mostra o traço das 3 composições propostas pela presente pesquisa.

Tabela 12 - Traço das composições de CCR propostas.

Formulação	Traço					
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Cinza	Água
CCR - RF	1,00	7,41	6,23	3,20	0,00	1,24
CCR - 5C	1,00	6,97	6,17	3,17	0,37	1,36
CCR - 10 C	1,00	6,60	6,17	3,17	0,74	1,48

Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado na tabela 12, houve um acréscimo de água nas formulações contendo cinza de madeira nos percentuais de 5% e 10%. Isso se deu pela alta absorção de água da cinza que, se fosse desconsiderada, acarretaria em uma considerável perda de resistência mecânica, como mostra a pesquisa de Nienkotter (2018).

#### 4.2.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova se fez conforme o apresentado no item 3.2.2.4. O processo de homogeneização da mistura é ilustrado na figura 19.

Figura 19 – Colocação dos agregados graúdos (a); Colocação do cimento (b); Colocação do agregado miúdo e cinza de madeira (c).

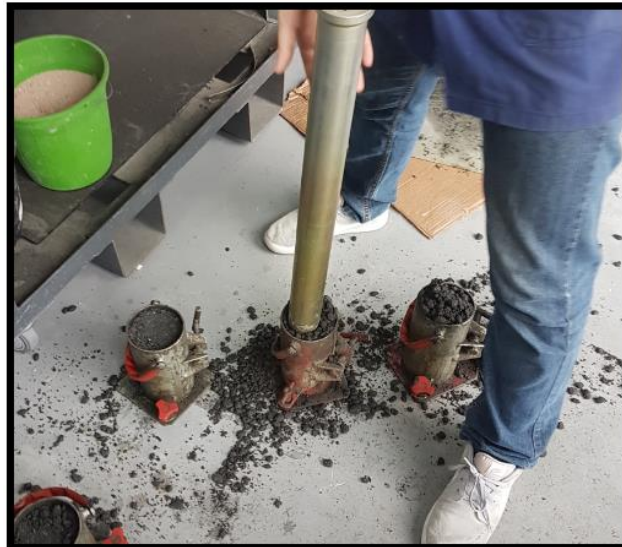


Fonte: Autor, 2018.

Foi observado que para a formulação de referência a homogeneização da mistura não se deu de forma ótima, visto que uma porção de argamassa ficou retidas nas pás da betoneira, contudo, a quantidade aderida não foi significativa a ponto de ser necessário o descarte da mistura.

A compactação foi feita manualmente, como demonstra a figura 20. Durante a compactação das camadas, teve-se cuidado com a distribuição de golpes nos CP, buscando atingir toda a superfície dos mesmos, assegurando que a compactação se desse de forma regular.

Figura 20 - Moldagem dos CP.



Fonte: Autor, 2018.

A figura 21 ilustra o tanque com água saturada em cal, não corrente, onde os CP foram mantidos até o momento da realização do ensaio de compressão axial e os CP retificados, no momento anterior a realização do ensaio.

Figura 21 - Cura em tanque com água saturada em cal (a); CP retificados (b).



Fonte: Autor, 2018

### 4.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CCR

#### 4.3.1 Consistência

Como o esperado, para todas as formulações o abatimento do CCR foi zero. Esta é uma característica imprescindível para este tipo de concreto, considerando que deve possuir uma trabalhabilidade na qual seja possível realizar seu adensamento por meio de rolos compactadores, estáticos ou vibratórios, garantindo o suporte dos equipamentos e a não aderência dos grãos nos mesmos. A figura 23 apresenta o resultado do ensaio para a formulação CCR – 10C.

Figura 22 - Abatimento da formulação CCR 10 – C.

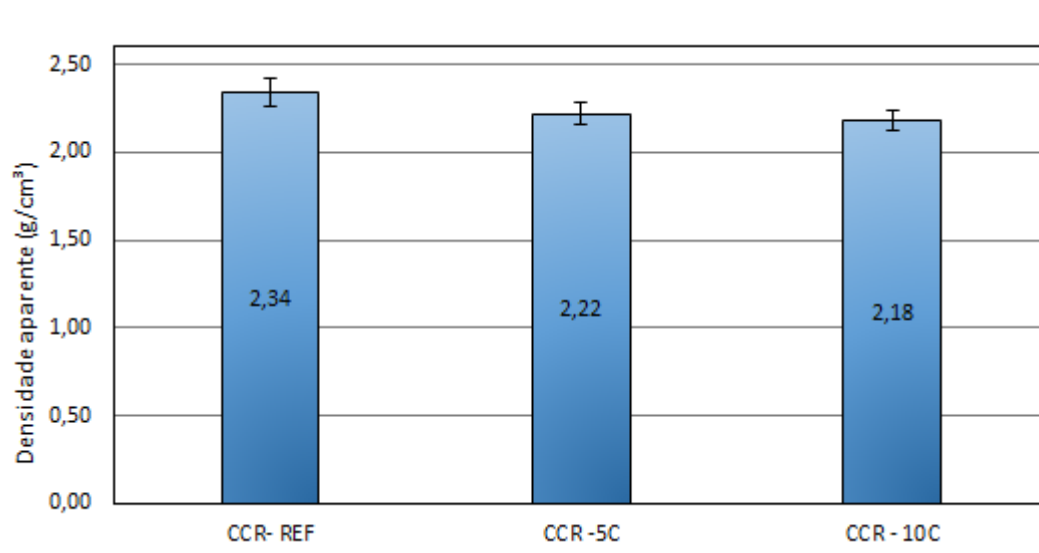


Fonte: Autor, 2018

#### 4.3.2 Propriedades físicas: Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Os resultados referentes a densidade aparente são apresentados no gráfico 17.

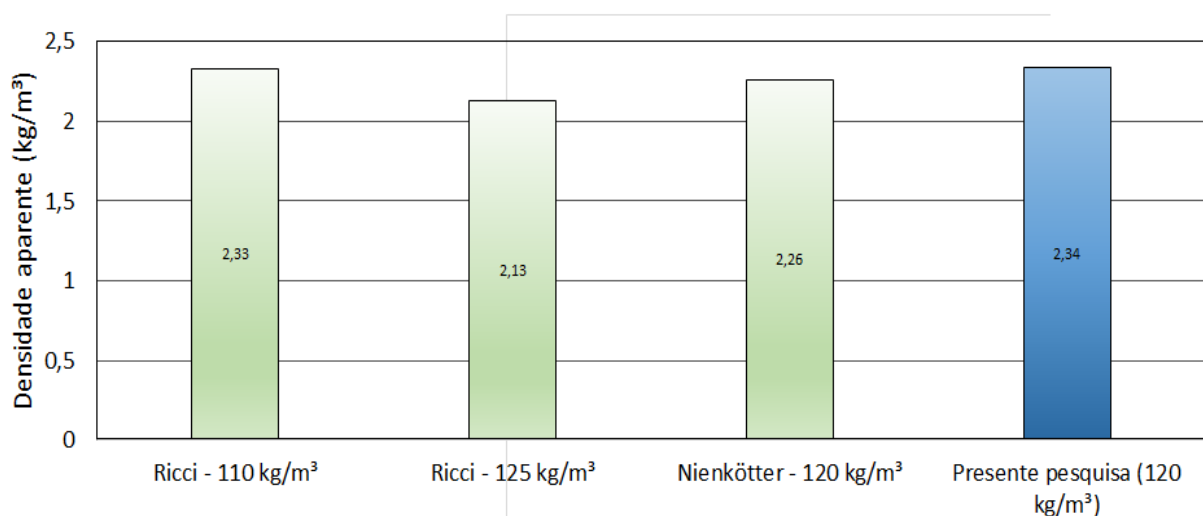
Gráfico 17 - Densidade aparente das formulações.



Fonte: Autor, 2018.

O valor médio da densidade aparente encontrada para a formulação de referência foi de  $2,34 \text{ g/cm}^3$ . Nota-se que existe uma tendência da diminuição da densidade aparente com o aumento gradativo do teor de cinza de madeira na mistura. Houve um decréscimo de 5,41 % e 7,34 % na densidade aparente em relação a referência para as misturas CCR – 5C e CCR – 10C respectivamente. Esse comportamento foi coerente, tendo em vista que estudos de Udoeyo *et al.* (2006), Cheah e Ramli (2011) e Chowdhury (2014) também apresentam uma queda de densidade com o acréscimo de cinza na composição do concreto. Os parâmetros encontrados se mostram semelhantes aos resultados obtidos em diversas pesquisas que utilizaram da mesma tecnologia de concreto. O gráfico 18 expõe alguns valores de densidade aparente obtidos nas pesquisas de CCR de Ricci, (2006) e Nienkötter, (2018).

Gráfico 18 - Densidade aparente para diversas pesquisas.

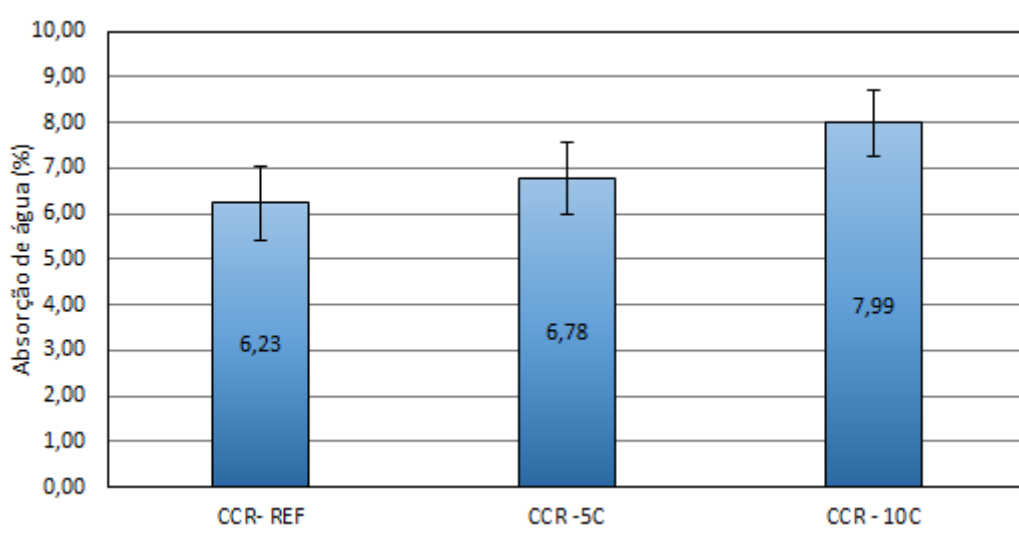


Fonte: Adaptado de Ricci, 2006 e Nienkötter, 2018.

O Gráfico 19 apresenta os dados obtidos para absorção de água das formulações.



Gráfico 19 - Absorção de água das formulações.



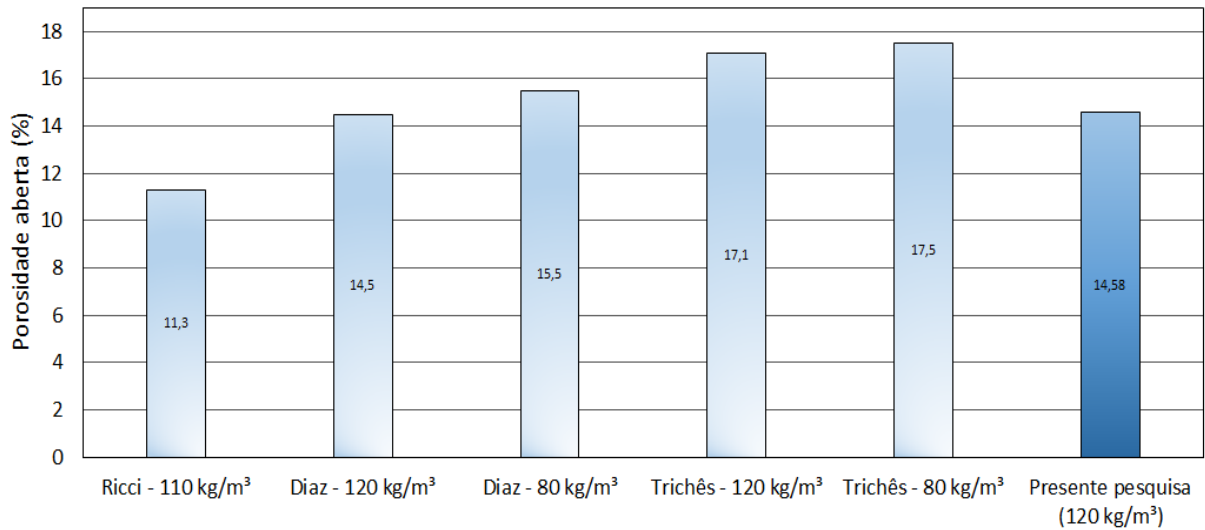
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se nos dados do gráfico 19 um aumento da absorção de água ao passo que o teor de cinzas na mistura aumenta. Para a formulação CCR – 5C o aumento foi de 8,83 %, e para a formulação CCR – 10C foi notado um crescimento de 28,25 % em relação a referência. Esse comportamento era o esperado, visto que os resultados obtidos pelos estudos de Udoeyo *et al.* (2006), Cheah e Ramli (2011) e Chowdhury (2014) apresentam a mesma tendência. Um dos possíveis motivos desse comportamento é a absorção de água da cinza de madeira, que se comparada a dos demais materiais, é bastante elevada.

Contudo, nota-se apenas um pequeno aumento da absorção de água na mistura da formulação CCR – 5C em relação à referência, isso se deve a homogeneização da mistura de referência, onde porções de argamassa ficaram retidas nas pás da betoneira. Trichês (1993) aponta em seus estudos que, a absorção de água da mistura é uma função do consumo de cimento da mesma, onde, quanto maior o teor cimentício menor será a absorção de água. Portanto, é possível afirmar que, se a homogeneização da mistura fosse realizada de forma ótima, a diferença de absorção de água das formulações teria sido ainda maior.

A absorção de água se encontra dentro do esperado para misturas de CCR. O Gráfico 20 mostra os resultados de absorção de água obtidos por Trichês (1993), Diaz (1993) e Ricci (2006).

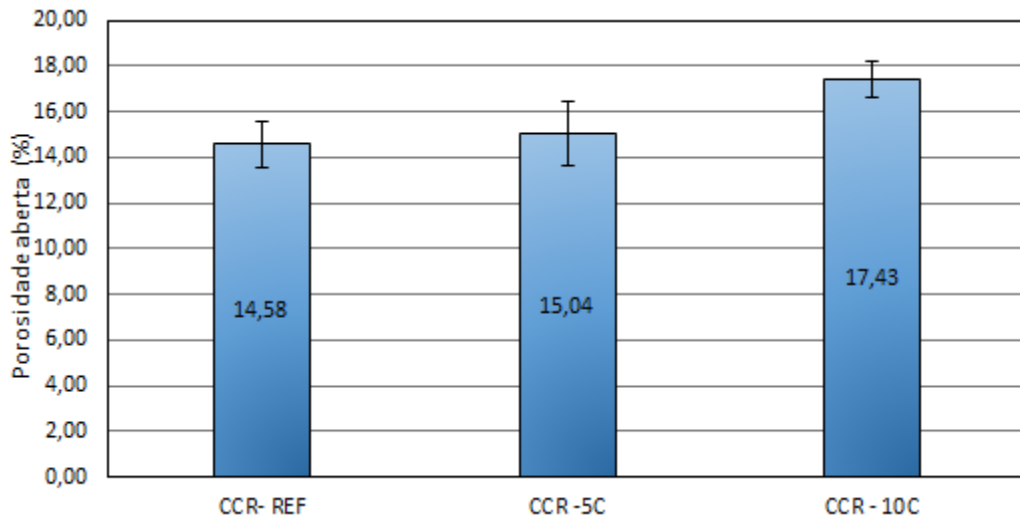
Gráfico 20 - Absorção de água para diversas pesquisas.



Fonte: Adaptado de Trichês, 1993; Diaz, 1993 e Ricci, 2006.

As informações relativas à porosidade aberta das misturas se encontram no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Porosidade aberta das formulações.



Fonte: Autor, 2018.

A porosidade aberta é uma propriedade, logicamente, relacionada a absorção de água. Comparando os resultados apresentados nas tabelas anteriores é possível observar que, quando menor a porosidade do material menor será sua absorção de água.

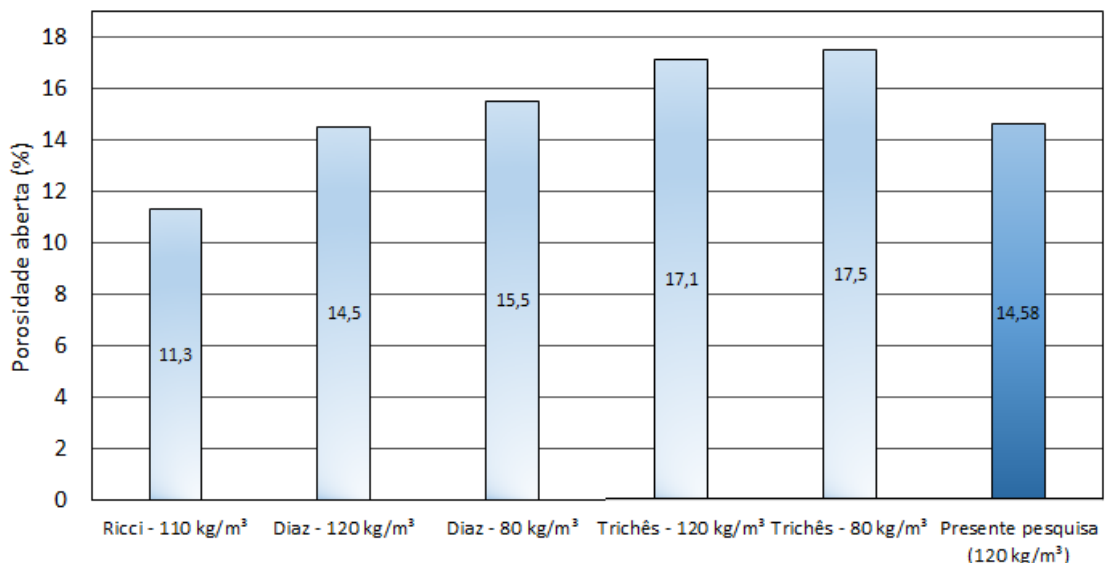
A formulação CCR – 5C apresenta um acréscimo de 3,16 % no volume de vazios em relação a referência, ao passo que a formulação CCR – 10C demonstra um crescimento de 19,55 % deste mesmo índice. Visto que a porosidade é relacionada com a absorção de água, as discussões acima descritas também são válidas para esta propriedade.

Trichês (1993) descreve que há uma propensão a diminuição da porosidade da mistura conforme o módulo de finura da composição granulométrica aumenta. O mesmo autor também aponta que uma composição granulométrica fechada leva, obviamente, a um índice de vazios menor.

Este fato pode explicar também os valores de porosidade tão próximos entre a referência e a formulação CCR – 5C, que em teoria, deveriam ser mais expressivos, visto que a incorporação de cinza tende a aumentar o volume de vazios da mistura conforme demonstram as pesquisas de Udoeyo *et al.* (2006), Cheah e Ramli (2011) e Chowdhury (2014). A argamassa retida nas pás da betoneira é composta de cimento, areia e água, a falta desta areia pode ter gerado uma pequena descontinuidade na curva granulometria da mistura, que por mais que não seja tão significativa, pode ter influenciado no resultado.

A porosidade aberta da mistura também se encontra dentro do esperado, tendo como base as pesquisas de Trichês (1993), Diaz (1993) e Ricci (2006). O Gráfico 22 apresenta a porosidade aberta obtida pelos autores.

Gráfico 22 - Porosidade aberta para diversas pesquisas.

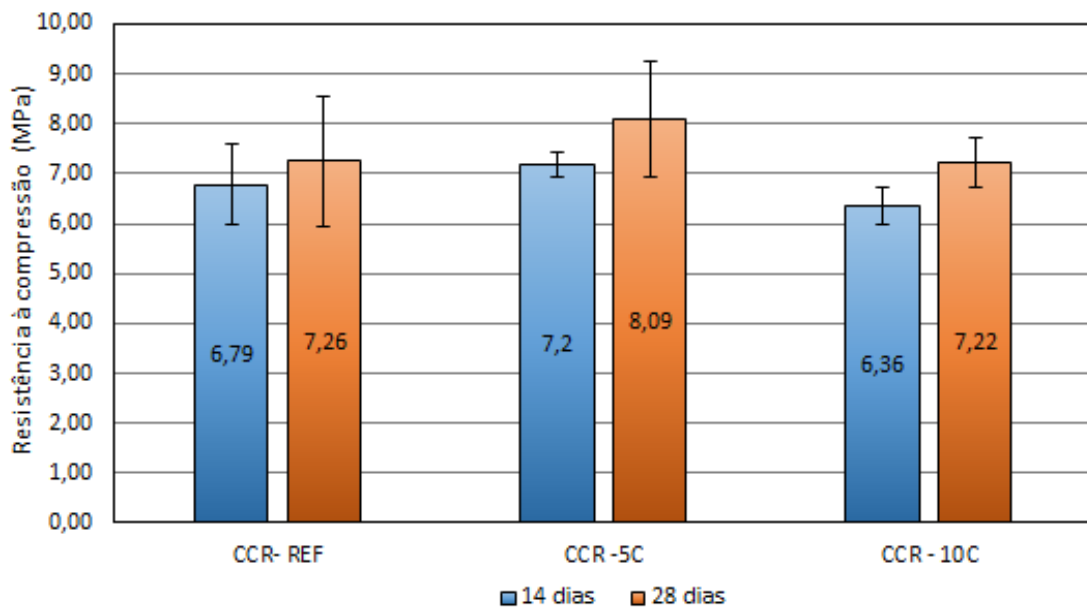


Fonte: Adaptado de Trichês ,1993; Diaz, 1993 e Ricci (2006).

### 4.3.3 Resistência à compressão

Os dados referentes ao ensaio de compressão axial do CCR aos 14 e 28 dias, para todas as formulações, estão expostos no gráfico 23.

Gráfico 23 - Resistência à compressão axial das misturas.



Fonte: Autor, 2018.

Foi observado que, em relação a referência, a formulação com 5% de adição de cinza de madeira teve um acréscimo de 6,92 % e 12,36% de resistência a compressão aos 14 e 28 dias respectivamente. Esses resultados divergem das pesquisas realizadas por Abdullahi, 2006, Cheah e Ramli, 2011 e Bennack (2016), onde os autores estudaram a influência da adição de cinza de madeira nas propriedades mecânicas do CCP. Os autores, de forma geral, apontam que com o aumento da cinza a resistência a compressão tende a diminuir, sobretudo nas idades iniciais.

Outro comportamento discrepante, comprando-se a formulação de referência com a CCR – 5C, é a relação entre a densidade aparente e resistência à compressão, visto que, para um mesmo consumo de cimento, a resistência à compressão tende a aumentar ao passo que a densidade também aumenta, o que para este caso não ocorre.

Isso pode ser explicado devido a homogeneização da mistura de referência, onde porções de argamassa ficaram retidas nas pás da betoneira, diminuindo o teor cimentício da mistura. Segundo Trichês (1993), Silva (2006) e Ricci (2007), o parâmetro de maior relevância para a resistência do material é o consumo de cimento, pelo fato do CCR ser um concreto pobre, ou seja, exibe um baixo consumo de cimento se comparado aos concretos plásticos tradicionais.

A densidade aparente mais elevada do CCR – REF também pode ser explicada. Segundo Trichês (1993), o aumento do consumo de cimento leva a uma diminuição da umidade ótima da mistura, que embora seja pequena é relevante, tendo em vista que o mesmo autor aponta que massa específica aparente é bastante sensível a pequenas variações do teor de umidade. A argamassa retida nas pás da betoneira, formada pela pasta de cimento hidratada e uma quantidade de agregados miúdos, diminuiu o consumo de cimento e também a quantidade de água presente na mesma, o que pode ter ajustado acidentalmente a umidade da mistura. Na presente pesquisa não foi realizado o ensaio de compactação Proctor para definir a umidade ótima das misturas, o resultado foi definido em função de estudos pré-existentes e é passível de erro.

Analisando o gráfico 23, nota-se que a resistência à compressão da formulação CCR – 10 C apresentou uma queda nos percentuais de 6,79% e 0,55% em relação à mistura de referência e 13,2% e 12,05% em relação à formulação CCR – 5C aos 14 e 28 dias respectivamente. Observando-se os resultados nota-se uma tendência, a mistura de referência, sem a adição de cinzas, apresentou um de acréscimo de 6,92 % de resistência nos 28 dias de cura em relação aos 14 dias, enquanto as misturas contendo adição de 5% e 10% de cinza apresentaram um acréscimo de resistência percentuais de 12,36% e 13,52% respectivamente.

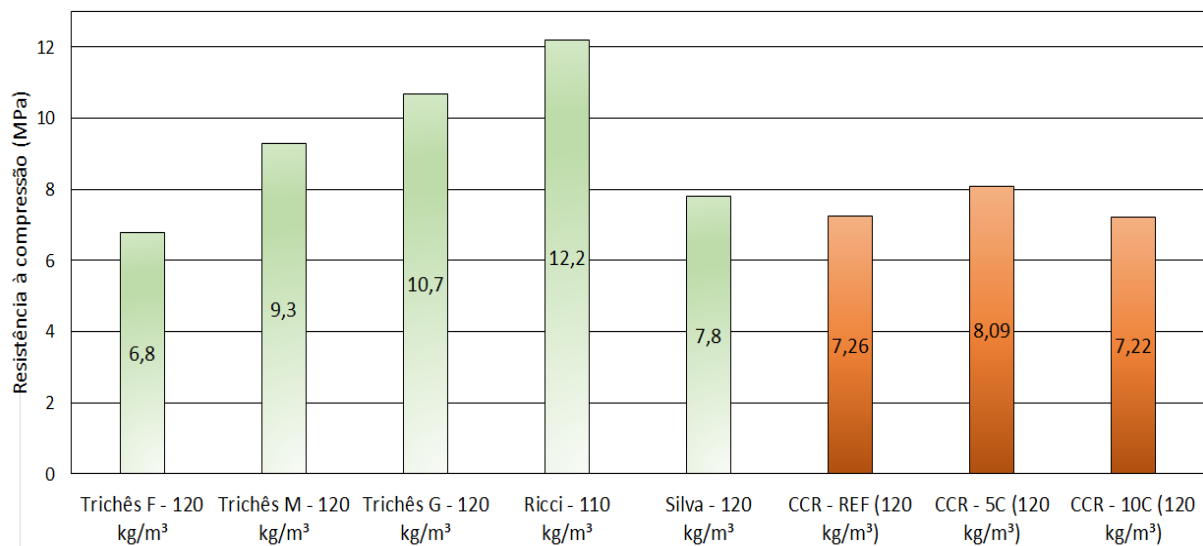
Este resultado é explicado pelo fato que a cinza de madeira, apesar de não ser considerada por norma um material pozzolânico, tem considerável presença de sílica e alumina em sua composição química o que confere ao resíduo um índice de atividade pozzolânica (BENNACK, 2016).

Nos estudos Chowdhury *et al.* (2015) também foi observada a mesma tendência, a adição de cinza resultou em uma diminuição da resistência a compressão, porém, com o passar do tempo, o acréscimo de resistência para as formulações com adição de cinza foi maior proporcionalmente em relação as misturas

de referência, devido ao aumento das atividades pozolânicas em idades mais avançadas.

A resistência obtida pelo presente trabalho apresenta valores competitivos se comparados a pesquisas realizadas utilizando-se a mesma tecnologia. O gráfico 24 expõe os valores de resistência à compressão axial obtidas pelas misturas de referência, sem adições, propostas por Trichês (1993), Silva (2006), Ricci (2007) e para as três formulações da presente pesquisa. Todos os estudos utilizaram a energia de compactação normal na moldagem dos CP, porém seus traços divergem.

Gráfico 24 - Resistência à compressão de diversas pesquisas.



Fonte: Adaptado de Trichês (1993), Silva (2006) e Ricci (2007).

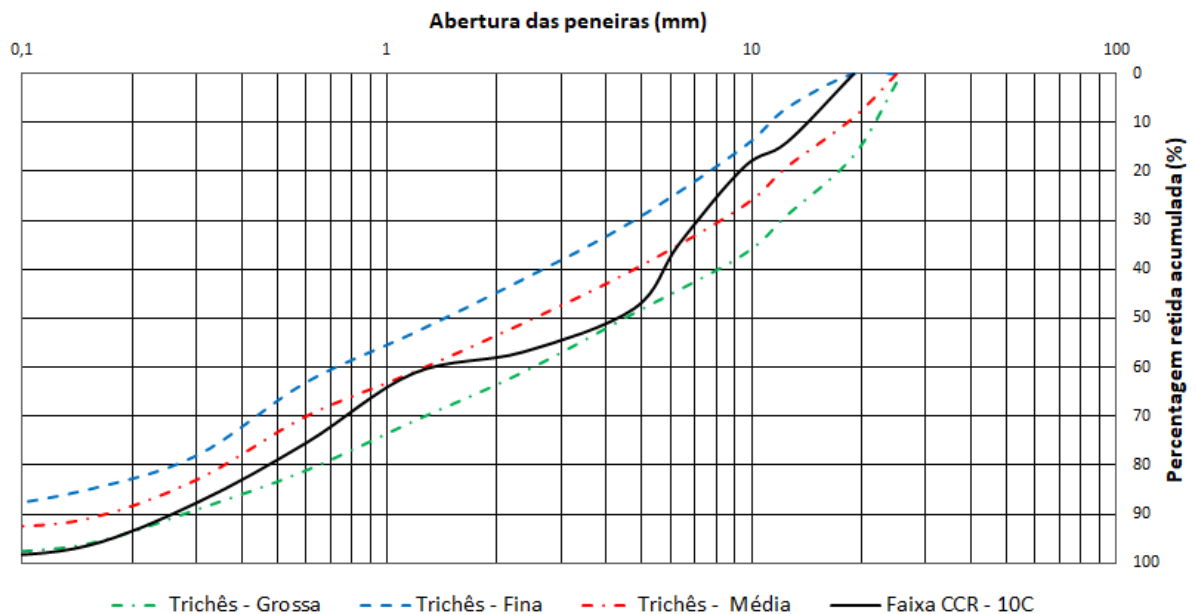
Pode-se observar no gráfico 24 que a formulação de referência do presente trabalho apresentou um incremento de 6,18% de resistência à compressão em relação à mistura de granulometria fina proposta por Trichês (1993), porém em relação às demais formulações, nota-se uma diminuição de 28,10%, 47,38%, 68,4% e 7,44% em relação a misturas de granulometria média e grossa de Trichês (1993), Ricci (2007) e Silva (2006) respectivamente.

A resistência do CCR, de forma geral, é uma função do consumo de cimento, energia de compactação, umidade e granulometria, sendo esses três últimos parâmetros relacionados diretamente com a densidade aparente e porosidade do material (TRICHÊS, 1993). O mesmo autor afirma, que aumento do teor de cimento é

a variável de maior relevância na dosagem do CCR, seguido da umidade, energia de compactação e granulometria.

É interessante notar também a influência da granulometria das misturas, que apesar de ser menos expressiva se comparado aos demais parâmetros, não deve ser desconsiderada, uma vez que Trichês (1993) aponta um aumento de 15% a 40% da resistência à compressão, para o mesmo consumo de cimento, com a variação da composição granulométrica. O mesmo autor afirma que, de forma geral, composições granulométricas grossas, com maior módulo de finura, apresentam uma resistência à compressão mais elevada. O gráfico 25 exibe a composição granulométrica adotadas por Trichês (1993) e pela presente pesquisa.

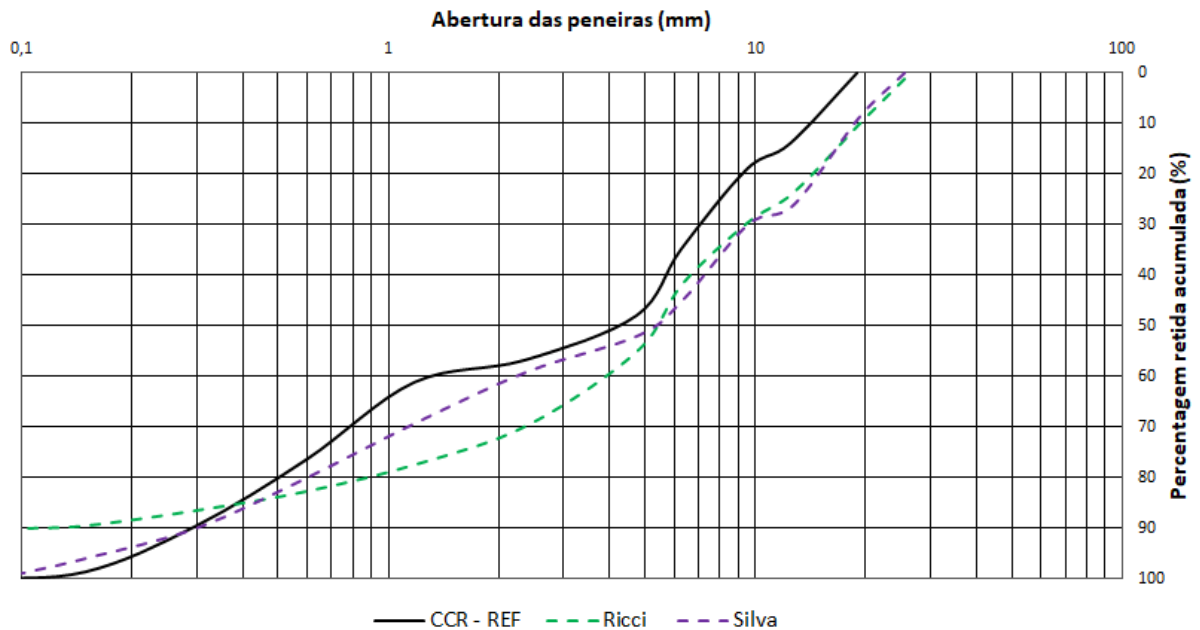
Gráfico 25 – Curva granulométrica da presente pesquisa comparada com as formulações de granulometria fina, média e grossa dos estudo de Trichês (1993).



Fonte: Adaptado de Trichês, 1993.

O gráfico 26 expõe as curvas granulométricas do presente estudo, Silva (2006) e Ricci (2007).

Gráfico 26 – Curva granulométrica da presente pesquisa comparada com Silva (2006) e Ricci (2007).



Fonte: Adaptado de Silva, 2006 e Ricci, 2007.

A tabela 13 mostra os valores do módulo de finura de cada composição granulométrica analisada.

Tabela 13 - Módulo de finura das composições granulométricas

Trichês - Fina	Trichês - Média	Trichês - Grossa	Silva	Ricci	Presente pesquisa
4,32	4,73	5,14	4,85	5	4,49

Fonte: Autor, 2018.

Conforme o esperado, misturas com uma composição granulométrica mais grossa tendem a exibir uma resistência à compressão superior. O módulo de finura do presente trabalho é compreendido entre a granulometria fina e média de Trichês (1993), os resultados de resistência também se encontram dentro deste mesmo intervalo, demonstrando assim a coerência dos resultados.

Em relação às misturas com adição de cinza de madeira, a formulação CCR – 5C apresentou um aumento de resistência à compressão de 18,97 % em relação à mistura de granulometria fina de Trichês e 3,72% a Silva (2006). É um resultado



bastante promissor, posto que esse percentual de adição leva a bons resultados levando em conta as variáveis da dosagem.

A formulação CCR – 10C também apresenta valores competitivos, notou-se acréscimo da resistência à compressão de 6,18 % em relação a mistura fina de Trichês (1993), que apresenta um módulo de finura semelhante. É importante notar que, com a incorporação da cinza, os módulos de finura das misturas não apresentaram uma queda significativa, exibindo os valores de 4,46 para CCR – 5C e 4,43 para CCR – 10C.

A norma DNIT/056 (2013) define que, para a utilização do CCR como uma camada de sub-base, a resistência à compressão axial aos 7 dias deve ser no mínimo 5 MPa. Para realizar tal análise, utilizou-se dos dizeres presentes da ABNT/NBR 6118 (2014) a fim de definir a resistência a compressão do CCR – REF aos 3 e 7 dias. É importante notar que a evolução da resistência a compressão de concretos com adição de cinzas difere dos concretos “convencionais”, ou seja, não é sensato utilizar-se da norma para estimar a resistência à compressão em idades prévias das misturas com incorporação de cinza.

A fim de definir parâmetros mais coerentes, utilizou-se dos estudos de Silva (2006), Winckler (2015) e Bennack (2016) para tentar definir a evolução esperada da resistência a compressão ao passar do tempo do concreto com adição de cinzas. Apesar de uma amostragem pequena, e existirem variáveis, como por exemplo o índice de pozolanicidade, que diferem entre os estudos, é mais razoável utilizar-se destes resultados, pois representam melhor tendência do crescimento da resistência ao passar do tempo observada em concretos com adição de cinzas.

A tabela 14 expõe a evolução esperada da resistência a compressão do concreto pela ABNT/NBR 6118 e do concreto com adições de cinza obtido pela pelos dados dos estudos de Silva (2006), Winckler (2015) e Bennack (2016).

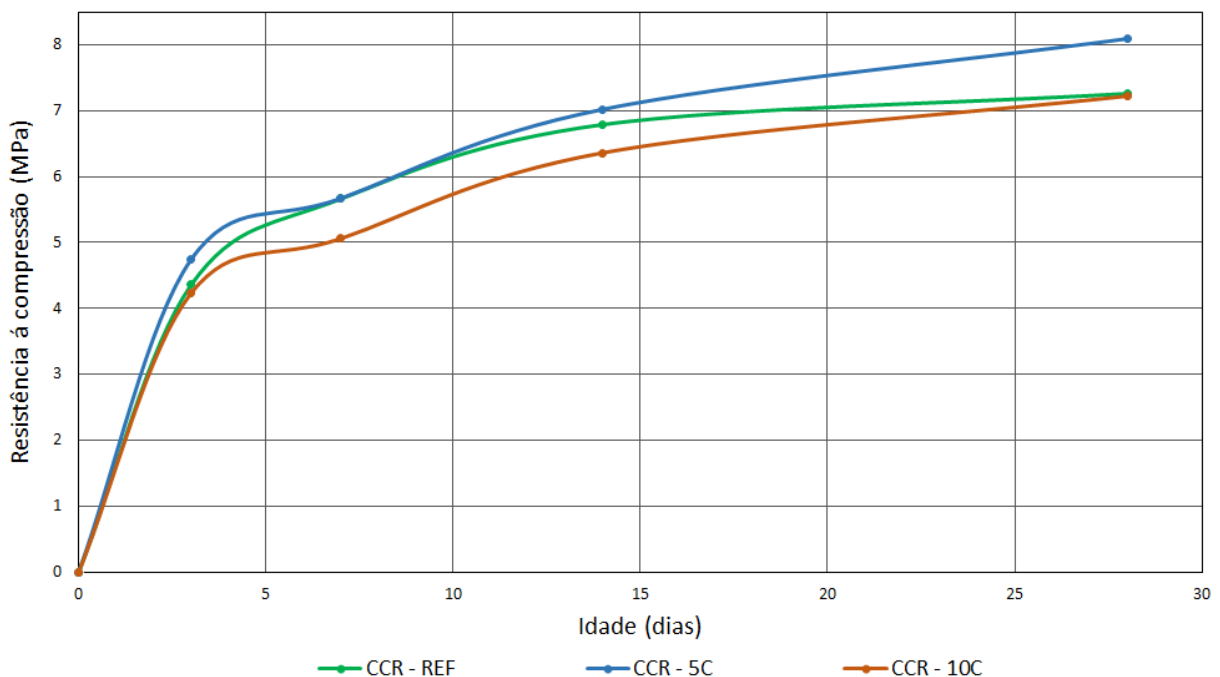
Tabela 14 - Evolução esperada da Resistência à Compressão

	Evolução esperada da Resistência à Compressão			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
NBR 6118	60,00%	78,00%	90,00%	100,00%
Pesquisas de Silva (2006), Winckler (2015) e Bennack (2016)	58,60%	70,09%	88,95%	100,00%

Fonte: Adaptado de ABNT/NBR 6118 (2014), Silva (2006), Winckler (2015) e Bennack, (2016).

Utilizando estas informações foi possível traçar uma curva que relaciona a idade em dias com a resistência à compressão média das formulações de CCR propostas no presente trabalho, apresentada no gráfico 27.

Gráfico 27 - Resistência à compressão x idade.



Fonte: Autor, 2018.

Fazendo a análise do gráfico obteve-se para 7 dias, as resistências à compressão de 5,66 MPa, 5,67 MPa e 5,06 MPa para as formulações CCR -REF, CCR – 5C e CCR – 10 C respectivamente, o que, segundo a norma, válida o uso de todas as formulações como camada de sub-base da estrutura de um pavimento.

Contudo, é importante notar que mesmo que a resistência à compressão das misturas com adição de cinza não tivesse atingido os parâmetros mínimos estabelecidos pela norma, seu uso como sub-base não poderia ser descartado imediatamente.

Os 5 MPa aos 7 dias de cura, requeridos pela norma para validação do material como sub-base é um parâmetro de campo, ou seja, é obtido por meio de ensaios de curta duração com o intuito de garantir que o material utilizado na obra atenda aos requisitos mínimos de utilização ao longo do horizonte de projeto. Para concretos sem adição, é um parâmetro coerente, visto que o comportamento do concreto “convencional” ao longo do tempo é bem conhecido. Contudo, misturas com adição de minerais com algum índice de pozolanicidade exibem um aumento de resistência consideravelmente maior conforme a idade, o que poderia implicar que um concreto com adição que não atingisse os 5 MPa aos 7 dias de cura exiba uma resistência admissível com o passar do tempo.

Utilizando-se dos parâmetros fornecidos pela MAC – Engenharia para obra de ampliação da SC – 120, com extensão de 38,98 Km e largura média de sub-base de 11,84 m, da espessura da camada de CCR estabelecida pela pesquisa de Fedrigo *et al.* (2014) de 20 cm, a densidade aparente do material e porcentagem em massa da cinza de madeira na mistura da presente pesquisa foi possível estimar o consumo do resíduo em uma obra rodoviária.

Para esses parâmetros, seria uma correspondência do consumo de 4016,36 toneladas e 7867,86 toneladas de cinza utilizando-se das formulações CCR – 5C e CCR – 10C como camada de sub-base de um pavimento, respectivamente. A partir destes dados nota-se, em função da quantidade significativa utilizada, a relevância do uso deste resíduo em obras desse porte.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como principal objetivo a validação técnica do uso de cinzas de madeira como substituição parcial do agregado miúdo na composição do CCR, para ser empregado como camada de sub-base. O estudo foi realizado determinando-se a resistência à compressão das misturas além da avaliação das propriedades físicas do CCR.

A partir dos ensaios de caracterização física do CCR observou-se que, a densidade aparente diminui à medida que o teor de cinzas na mistura aumenta. A porosidade aberta e absorção de água aumentaram proporcionalmente com a adição das cinzas, o que pode ser justificado considerando que a absorção de água da cinza é relativamente elevada.

Quanto a resistência à compressão, foi constatado um aumento de 12,36 % da formulação CCR – 5C e uma diminuição de 0,55% da formulação CCR – 10C em relação à referência aos 28 dias. Mesmo considerando o incremento da resistência que a mistura de referência “sofreria” com uma homogeneização ótima, os resultados encontrados são positivos.

Constatou-se um comportamento peculiar no aumento de resistência ao passar do tempo para as formulações com adição de cinza de madeira. Essas misturas apresentaram um acréscimo de resistência com a idade superior ao encontrado em concretos “convencionais”, sem adições. Comportamento esse explicado pela atividade pozolânica da cinza, que apesar de por norma não ser considerada um material pozolânico, apresenta um certo índice de pozolanicidade devido aos teores consideráveis de sílica e alumina em sua composição química. A tendência é, que quanto maior o teor de cinza maior seja a evolução da resistência a compressão ao passar do tempo.

Em relação a pesquisas existentes, os valores de resistência se mostram bastante coerentes, dado que são bastante próximos para variáveis de mistura semelhantes. Para o CCR, a resistência a compressão é uma função do consumo de cimento, umidade, energia de compactação e composição granulométrica. Dentre as pesquisas analisadas os parâmetros de mistura estão próximos, excluindo-se a granulometria, que variou consideravelmente dentre as pesquisas.

O CCR, de forma geral, apresenta uma resistência à compressão superior para maiores módulos de finura. Analisando misturas com um módulo de finura semelhante, notou-se que a resistência à compressão obtida para as formulações do presente trabalho atingiu valores bastante semelhantes ou superiores.

Todas as formulações atenderam ao parâmetro de 5 MPa requerido pela norma para validar o uso do material como camada de sub-base, porém é importante notar que o uso desse parâmetro deveria ser analisado de forma diferente para misturas que tenham adição de materiais com algum grau de pozolanicidade.

A evolução da resistência à compressão do concreto sem adições já é bem conhecida, a resistência medida aos 7 dias, para este caso, representa adequadamente o comportamento do material ao longo do horizonte do projeto. No caso de materiais com adição de cinzas, por exemplo, misturas que não apresentassem o valor de resistência mínimo aos 7 dias poderiam, ao longo do tempo, exibir valores que validassem sua utilização, visto que o incremento da resistência ao longo do tempo neste caso é mais elevado que o observado em um concreto “convencional”.

Notou-se que o uso da tecnologia estudada em uma obra rodoviária acarretaria na utilização expressiva das cinzas de madeira. Para uma rodovia de aproximadamente 40 km, o consumo de cinza estimado foi de 4016,36 toneladas para 5% de adição e 7867,86 toneladas para 10%.

Com base no conjunto de resultados obtidos no presente trabalho, conclui-se que o uso das cinzas de madeira como substituição parcial do agregado miúdo na dosagem do CCR como sub-base é bastante promissor. A utilização do resíduo em uma obra acarretaria em um alto consumo do mesmo, que de outra forma, seria descartado. Tendo em vista a falta de regularização quanto ao descarte de resíduos no país, a incorporação das cinzas no traço do CCR leva a uma redução significativa de impactos ambientais, o que ressalta a relevância da presente pesquisa.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- O estudo da influência de diferentes faixas granulométricas, consumo de cimento e energia de compactação na resistência à compressão da mistura;

- A realização do ensaio de compactação com o propósito de definir a umidade ótima das formulações;
- Realizar ensaios de compressão aos 7, 14, 28, 60 e 90 dias com o objetivo de estudar a evolução da resistência a compressão ao passar do tempo para misturas com adição de cinza;
- Desenvolver um parâmetro de validação do uso do CCR como sub-base mais adequado para misturas que tenham a adição de materiais que exibem atividade pozolânica;
- Estudar a viabilidade adição de cinza de cinza nos teores de 20% e 30%;
- O dimensionamento de um pavimento utilizando o CCR como camada de sub-base;

## REFERÊNCIAS

ABDULLAHI, M. **Characteristics of wood ash/OPC concrete**. Electronic J Pract Technol, 2006.

ABREU, J. V. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

ANDRADE, W. P. **“Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaio e Propriedades / Autores: Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico”**. Editora Pini. São Paulo – 1997. Pág. 66.4 – 73.4, 1.16 – 27.16.

ANDRADE, W. P. **Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaio e Propriedades**. Editora Pini. São Paulo – 1997. Pág. 66.4 – 73.4, 1.16 – 27.16.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: **IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON**. São Paulo - SP. 2001.

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172**. Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 16312-2**: Concreto compactado com rolo - Parte 2: Preparação em laboratório. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman, Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, 2000.

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

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

BAUER, L. A. **Materiais de construção.** São Paulo, 1995.

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.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução a Engenharia Ambiental: O Desafio do Desenvolvimento Sustentável.** São Paulo: Person Prentice Hall, 2005.

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.

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

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. **DNIT 056/2013:** Pavimento Rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 001,** de 23 de janeiro de 1986. Brasília, 1986. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 15 set. 2018.

CANADIAN PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Roller compacted concrete (RCC) pavements – design and construction.** Ottawa, [20-].

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.



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

CHOWDHURY, S.; MISHRA, M.; SUGANYA, O. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 429–437, 2015.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução No313: Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília, 2002.

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

DIAZ, P. S. H. **Contribuição ao estudo do concreto rolado para pavimentação**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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.

FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, 2018.

FREIRE, W. J.; BERARDO, A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção: cinzas e aglomerantes alternativos**. Campinas: UNICAMP, 2003.

FUJIMURA, F.; HENNIES, W. T.; SILVA, M. A. R.; SOARES, L. **“O Uso de Finos de Pedreira de Rochas Gnáissicas e Graníticas em Substituição às Áreas Naturais”**. Anais. 29º Reunião Anual de Pavimentação. v 1. Cuiabá – MT, 23 a 27 de setembro de 1995. p 146 – 151.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.  
HARRINGTON, D.; ABDO, F.; ADASKA, W.; HAZAREE, C. V.; CEYLAN, H.; FATIH, B. **Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements**. 2010.

HORTA, Carmo et al. Avaliação do potencial fertilizante de dois resíduos da indústria florestal. **Rev. de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 33, n. 2, p. 147-159, dez. 2010. Disponível em <[http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0871-018X2010000200013&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2010000200013&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 26 set. 2018.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias**: estudo de caso da cinza de casca da castanha de caju. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2008.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in concrete technology. Volume 1, Canadá, 1996.

MALTZ, R. **Ampliação dos conceitos do ambientalista José Antonio Lutzenberger no tratamento de resíduos da Klabin Riocell**. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003.

MARCHAND, J., BOISVERT, S., TREMBLAY, J. PIGEON, M. **“Air entrainment in no slump mixes”**. Concrete International, April, 1998.

MCLELLAN, B. C. et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, issues 9-10, p. 1080-1090, jun./jul. 2011.

MEDDAH, A.; BEDDAR, M.; BALI A. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, Alergia, v. 72, p. 187-192, fev./mar. 2014.

MESQUITA, A. S. G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina – Piauí. **HOLOS**, v. 2, p. 58-65, 2012.

MESQUITA, J. C. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária – Estudo de caso: Rodovia BR-262, Miranda – Morro do Azeite–MS**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – IPR. DIVISÃO DE CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA., **Pavimento rígido – Pavimento de Concreto de Cimento Portland, compactado com Rolo: Especificação de Serviço.DNIT 059/2004 - ES**. 2004. p 01 – 11.

MOLINA, J. E. **Adicion de Ceniza de cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado com Rodillo**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Escuela Superior Politecnica del Litoral Ecuador, [s.l], 2002.

MORAES, Brenda B. et al. A Engenharia de Tráfego na Logística de Transporte Rodoviário. **Universitári@ - Revista Científica do Unisalesiano – Lins**. Ano 04, v. 9, 2013.

RASHED, M.U. **Roller compacted concrete (RCC) innovations in civil conctructions world**. [s.l: 2010].

MÜLLER, A. P. S. **Análise das condições do pavimento de concreto do corredor de ônibus da cidade de Santa Maria**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

NAIK, T. R., Kraus, R. N. **Wood ash: a new source of pozzolanic material**. Concrete International, 2001.

NIENKÖTTER, Y. S. L. **Adição de cinza de madeira em Concreto Compactado com Rolo como sub-base de pavimento rígido**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

PÉREZ, Y. A. G. **Avaliação do Desempenho Mecânico e Reológico de Misturas Asfálticas Mornas**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

Pinto, P. C. **Investigação de parâmetros do CCR com incorporações de escória granulada de alto forno para utilização como base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

PITTMAN, D. W. **“Construction of Roller Compacted Concrete Pavements”**. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi. 1985.

QUEIROZ, F. A. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Capina Grande, 2011.

RAMEZANIANPOUR, A. A. et al. Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 260–266, 2017.

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.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Aproveitamento de resíduos na construção civil**. Coletânea Habitare: utilização de resíduos na construção habitacional. p.65 - 127. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

ROHDE, Luciana. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos – Estudo Laboratorial**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SACHET, T. **Estudo das propriedades mecânicas de Concretos Compactados com incorporação de fresados para base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol. 2, 1 ed., São Paulo: Pini, 2001. 688 p.

SIDDIQUE, R. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing**. Resources, Conservation and Recycling, 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**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TANGO, C. E. S. **“Fundamentos de dosagem do concreto para blocos estruturais”**, 5º International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianópolis – Brazil. 21 – 24 August, 1994.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado com rolo para aplicação em pavimentos: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1993.

TRICHÊS, G; DA SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade técnica de utilização da Cinza Pesada em adição ao Concreto Compactado com Colo para a aplicação em camadas de base de pavimentos compostos**. In: 36.a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – 36.ª RAPv, Curitiba, 2005.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. 1927, p. 439–471, 2011.

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

WINCKLER, J. R. **Caracterização Física e Química de *Pinnus spp.* para a adição em produtos de cimento Portland: Concreto e Argamassa**. Dissertação (Mestrado). LACTEC. Curitiba, 2015.