

ANO
2020



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
MECÂNICO DE CONCRETO
COMPACTADO COM ROLO,
DOSADO COM AGREGADO
RECICLADO DE CONCRETO, PARA
BASE DE PAVIMENTOS**

HEDELVAN EMERSON FARDIN

JOINVILLE, 2020

HEDELVAN EMERSON FARDIN | AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, DOSADO COM AGREGADO RECICLADO DE
CONCRETO, PARA BASE DE PAVIMENTOS

Há uma grande necessidade de se substituir os agregados naturais em nosso cotidiano. Concomitantemente, a malha rodoviária brasileira carece de melhorias e obras desse porte requerem grande volume de insumos. Devido a isso, foi analisado o desempenho mecânico de Concreto Compactado Com Rolo (CCR), com incorporação de Agregado Reciclado de Concreto (ARC) para aplicação em base de pavimentos. Foram avaliadas misturas de CCR com taxas de incorporação de ARC iguais a 5%, 15% e 30%.

Orientadora: Dr^a. Adriana Goulart dos Santos

Joinville, 2020

HEDELVAN EMERSON FARDIN

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETO COMPACTADO
COM ROLO, DOSADO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO, PARA
BASE DE PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para obtenção do título de Mestre,
em Engenharia Civil, na Universidade do Estado de
Santa Catarina.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriana Goulart dos
Santos.

JOINVILLE
2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Fardin, Hedelvan Emerson

Avaliação do desempenho mecânico de concreto compactado com rolo, dosado com agregado reciclado de concreto, para base de pavimentos / Hedelvan Emerson Fardin. -- 2020.

150 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2020.

1. Concreto compactado com rolo. 2. Agregado reciclado de concreto. 3. Desempenho mecânico. 4. Base de pavimento. 5. Dimensionamento mecanicista. I. Santos, Adriana Goulart dos. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**Avaliação do Desempenho Mecânico de Concreto Compactado com Rolo,
Dosado com Agregado Reciclado de Concreto, para Base de Pavimentos**

por

Hedelvan Émerson Fardin

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Adriana Goulart dos
Santos
CCT/UDESC
(Orientadora/Presidente)

Profa. Dra. Tatiana Cureau Cervo
UFSM

Profa. Dra. Carmeane Effting
CCT/UDESC

Joinville, SC, 6 de maio de 2020.

Ao meu já declarado inexorável refúgio,
Pai e Mãe.

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grato à minha família, por terem apoiado minha decisão em abandonar o lar e a estabilidade de outrora para lançar-me ao desconhecido, longe daquilo que conhecia por meu cotidiano. Claro, agradeço por todo suporte recebido no período do mestrado, sendo ele financeiro ou essencialmente emocional. Portanto, agradeço à minha mãe, Helenita, ao meu pai, Nerei, à minha irmã, Jociane e seu marido, Adelar. Agradeço também pelo carinho dos meus sobrinhos Eduan e Arthur.

Agradeço à Professora Ma. Camila Crauss por ter incentivado minha candidatura ao mestrado e por ter me falado sobre a UDESC.

À minha orientadora, Professora Dr^a. Adriana Goulart dos Santos, por ter me acolhido no programa de pós-graduação, ter me guiado pelos caminhos da pesquisa, sugerindo o tema da dissertação e incentivando-me a seguir em frente ante as dificuldades.

Aos professores do PPGECC pelo conhecimento transmitido.

Ao Departamento de Engenharia Civil do CCT da UDESC, pela utilização dos equipamentos e alguns materiais dos Laboratórios de Materiais de Construção Civil e Laboratório de Geotecnia e Pavimentação.

Ao pessoal bastante solícito dos laboratórios supracitados: Dr. Adilson Schackow, que sempre me ajudou durante os ensaios e a quem bastante recorri para tirar algumas dúvidas metodológicas. Sr. John Neves Braga Santos que constantemente acompanhava a realização de experimentos em seu laboratório.

Aos alunos Bruna Hreisemnou, pelo auxílio nos ensaios de compactação; João Pedro Bittencourt pela ajuda nas moldagens dos CP prismáticos e Caroline da Silva pela parceria nas primeiras etapas experimentais da pesquisa, como aluna voluntária de Iniciação Científica.

Ao David Willian Sperber Sell que decidiu acompanhar minha jornada, animando-me quando necessário, lendo o trabalho e amenizando minhas angústias.

À FAPESC e à CAPES pela disponibilização de bolsa de estudos.

À empresa Terraplanagem Medeiros pela doação do resíduo.

Todo mundo quer viver em cima da montanha, sem saber que a verdadeira felicidade está na forma de subir a escarpada (MÁRQUEZ, Gabriel García).

Não adianta se entregar aos sonhos se você esquecer de viver (ROWLING, J. K.)

RESUMO

A necessidade de se encontrar materiais alternativos, capazes de substituir agregados naturais, para produção de concreto é fundamental em nosso cotidiano, pois seu uso representa o consumo de recursos finitos do planeta e atualmente, há entraves para implantação de novas jazidas para extração de agregados naturais. Concomitantemente, a infraestrutura rodoviária brasileira é carente de melhorias e obras de pavimentação requerem um grande volume de materiais. Por isso, foi definido como objetivo principal dessa pesquisa, aferir as propriedades mecânicas do Concreto Compactado com Rolo (CCR), dosado com Agregado Reciclado de Concreto (ARC), para emprego em camadas de base de pavimentos. Assim, de forma mais específica, buscou-se dosar uma mistura referência de CCR com agregados naturais e misturas de CCR com substituição em massa dos agregados naturais por ARC às taxas de 5%, 15% e 30%; aferir o desempenho mecânico do CCR com adição do resíduo para base de pavimentos, em comparação ao traço usual de CCR, sem adição do resíduo; analisar estatisticamente, a influência da adição do ARC nas propriedades mecânicas do CCR; e avaliar seções de pavimentos que utilizam a base em CCR com ARC, dimensionadas a partir de uma abordagem empírico-mecanicista. Foram dosadas misturas de CCR para identificar a aplicabilidade do resíduo como agregado graúdo ao CCR. Inicialmente o consumo de cimento adotado para dosagem foi igual a 120 kg/m³, mas como os resultados dos ensaios mecânicos não foram satisfatórios, optou-se pela utilização de 200 kg/m³ de cimento. Quanto à avaliação do desempenho mecânico do CCR, foram conduzidos ensaios de compactação, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, às idades de 7 e 28 dias. Também foram realizados ensaios de módulo de elasticidade, absorção de água, massa específica e índice de vazios aos 28 dias. Para avaliar estatisticamente os resultados obtidos na parte experimental, foram realizadas Análises de Variância (ANOVA) para as propriedades mecânicas do CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ e ajustes lineares entre as propriedades mecânicas e físicas do concreto. Além disso, foi utilizado o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) para dimensionar seções de pavimentos com a base de CCR, buscando averiguar a empregabilidade dos materiais dosados no programa experimental. Através da análise de variância, verificou-se que algumas propriedades mecânicas do CCR sofrem reduções devido à porcentagem de ARC na mistura. As misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³, apresentaram bons resultados mecânicos, atendendo aos valores mínimos requeridos por normas rodoviárias nacionais vigentes. As respostas referentes aos acúmulos de danos nas seções de pavimentos com a base em CCR, apontaram que é viável utilizar o CCR com ARC para executar camada se base de pavimentos sujeitos a um nível alto de tráfego.

Palavras-chave: Concreto compactado com rolo. Agregado reciclado de concreto. Desempenho mecânico. Base de pavimento. Dimensionamento mecanicista.

ABSTRACT

The need to find alternative materials, capable of replacing natural aggregates, for the production of concrete is fundamental in our daily lives, as its use represents the consumption of finite resources on the planet and currently, there are obstacles to the implantation of new deposits for the extraction of natural aggregates. Concomitantly, the Brazilian road infrastructure requires improvements and paving works require a large volume of materials. For this reason, it was defined as the main objective of this research, to assess the mechanical properties of Roller Compacted Concrete (RCC), dosed with Recycled Concrete Aggregate (RCA), for use in base layers of pavements. Thus, in a more specific way, an attempt was made to dose a reference mixture of RCC with natural aggregates and mixtures of RCC with substitution of natural aggregates by RCA at ratios of 5%, 15%, and 30% by mass; measuring the mechanical performance of the RCC with the addition of the residue for the base of pavements, in comparison to the usual RCC mix, without RCA; statistically analyzing the influence of adding RCA on the mechanical properties of the RCC; evaluating sections of pavements that use the base in RCC with RCA, designed from an empirical-mechanistic approach. RCC mixtures were mixed to identify the applicability of the RCA as coarse aggregate for RCC. Initially, the cement content used for the mix was equal to 120 kg/m³, but as the results of the mechanical tests were not satisfactory, it was decided to use 200 kg/m³. As for the evaluation of the mechanical performance of the RCC, compaction tests were conducted, compressive strength, splitting tensile strength, flexural tensile strength, at the ages of 7 and 28 days. Tests of modulus of elasticity, water absorption, specific mass, and void index were also performed at 28 days. To evaluate statistically the results obtained from experimental tests, Analyses of Variance (ANOVA) were performed for the mechanical properties of the RCC with a cement content of 200 kg/m³ and linear regressions between the mechanical and physical properties of the concrete. Also, the National Pavement Dimensioning Method (MeDiNa) was used to design sections of pavement with the RCC base, seeking to ascertain the employability of the mixed materials in the experimental program. Through the analysis of variance, it was found that some mechanical properties of the RCC are reduced due to the percentage of RCA in the mixture. Mixtures with a cement content of 200 kg/m³ displayed good mechanical results, meeting the minimum values required by current national road standards. The responses regarding the accumulation of damage in the sections of pavements with the RCC base pointed out that it is feasible to use the RCC with RCA to execute the base layer of pavements subject to a high level of traffic.

Keywords: Roller compacted concrete. Recycled concrete aggregate. Mechanical performance. Base layer of pavement. Mechanistic approach design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Faixas granulométricas sugeridas pelo PCA e DNIT	35
Figura 2 - Sugestão de aprimoramento da faixa granulométrica do PCA.....	36
Figura 3 - Esquema de dimensionamento empírico-mecanicista	59
Figura 4 - Fluxograma do SisPav	61
Figura 5 - Tela inicial do MeDiNa	62
Figura 6 - Fluxograma do programa experimental.....	67
Figura 7 - Utilização de ARC para execução de aterro	68
Figura 8 - Amostras dos grupos requeridos pela NBR 15116	70
Figura 9 - Amostras dos agregados utilizados na pesquisa	71
Figura 10 - Curvas granulométricas dos agregados.....	72
Figura 11 - Limites da NBR 7211 para agregados miúdos.....	73
Figura 12 - Limites da NBR 7211 para agregados graúdos	74
Figura 13 - Desenho esquemático da etapa de dosagem das misturas de CCR	76
Figura 14 - Curvas granulométricas das misturas de referências.....	78
Figura 15 - Curvas granulométricas das misturas com 120 kg/m ³ de cimento	79
Figura 16 - Curvas granulométricas das misturas com 200 kg/m ³ de cimento	79
Figura 17 - Ensaio de compactação do CCR: (a) homogeneização das misturas; (b) compactador mecânico	82
Figura 18 - Registro de etapas da moldagem de CP cilíndricos.....	83
Figura 19 - Registro da moldagem de CP prismáticos	84
Figura 20 - Ensaio de RTD	86
Figura 21 - Esquema do ensaio de RTF segundo a NBR 12142.....	87
Figura 22 - Esquema de RTF com CP prismático reduzido, com dimensões em mm	88
Figura 23 - Ensaio de RTF: (a) CP de dimensões em mm; (b) realização do ensaio	89
Figura 24 - Ensaio do módulo de elasticidade: (a) Strain gage; (b) detalhe da execução do ensaio; (c) sistema para aquisição de dados.	91
Figura 25 - Desenho esquemático dos dimensionamentos no MeDiNa	95
Figura 26 - Exemplo de seção dimensionada, com espessuras em cm.....	96
Figura 27 - Curvas de compactação para CCR com 120 kg/m ³ de cimento.....	98

Figura 28 - Curvas de compactação para CCR com 200 kg/m ³ de cimento	99
Figura 29 - Resultados de RCS	103
Figura 30 - Comparação de médias de RCS aos 7 dias	107
Figura 31 - Comparação de médias de RCS aos 28 dias	108
Figura 32 - Comparação de médias de RCS aos 28 dias com resultados de pesquisas internacionais	109
Figura 33 - Resultados de RTD	111
Figura 34 - Comparação de médias de RTD aos 7 dias.....	113
Figura 35 - Comparação de médias de RTD aos 28 dias.....	114
Figura 36 - Médias de RTD para pesquisas acerca de CCR com ARC	115
Figura 37 - Resultados de RTF	116
Figura 38 - Resultados de RTF aos 7 dias para diferentes misturas de CCR	117
Figura 39 - Resultados de RTF aos 28 dias para diferentes misturas de CCR	117
Figura 40 - Resultados de módulo de elasticidade	119
Figura 41 - Resultados de módulo de elasticidade para diferentes misturas de CCR	120
Figura 42 - Relações lineares entre umidade ótima e massa específica aparente seca máxima: (a) das misturas de 120 kg/m ³ de cimento; (b) das misturas de 200 kg/m ³ de cimento	124
Figura 43 - Relações lineares entre as propriedades mecânicas dos CCR com 200 kg/m ³ de cimento.....	125
Figura 44 - Relações lineares com propriedades físicas do CCR	128
Figura 45 - Superfície de resposta para ATE, tendo constante $N=3,3 \times 10^7$	130
Figura 46 - Superfície de contorno para ATE com $N = 3,3 \times 10^7$ constante	131
Figura 47 - Superfície de resposta para espessura da seção do pavimento com $N=3,3 \cdot 10^7$ constante	132
Figura 48 - Superfície de contorno para espessura da seção do pavimento e $N = 3,3 \cdot 10^7$ constante	133
Figura 49 - Superfície de resposta para ATR, com $N = 3,3 \times 10^7$ constante	134
Figura 50 - Superfície de contorno para ATR, com $N = 3,3 \times 10^7$ constante	134

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Planilha eletrônica utilizada para os cálculos da quantidade de insumos para CCR	80
Tabela 1 - Números de golpes e camadas para corpos de prova de CCR	39
Tabela 2 - Resultados de CCR para base e sub-base de pavimentos	40
Tabela 3 - Requisitos para CCR no Brasil	44
Tabela 4 - Resultados mecânicos para CCR com 200 kg/m ³ de cimento com fibras	46
Tabela 5 - Alguns resultados de misturas de CCR com substituições de agregados miúdos	49
Tabela 6 - Alguns resultados de misturas de CCR com substituições de agregados graúdos	52
Tabela 7 - Alguns resultados de misturas de CCR com ARC	53
Tabela 8 - Critérios de parada do dimensionamento e confiabilidade	65
Tabela 9 - Porcentagens passantes dos agregados	72
Tabela 10 - Resultados dos ensaios dos agregados	74
Tabela 11 - Determinação do índice de forma do ARC	75
Tabela 12 - Determinação da composição do agregado reciclado por análise visual	75
Tabela 13 - Quantidade de insumos para misturas de CCR com 120 kg/m ³ de cimento	81
Tabela 14 - Quantidade de insumos para misturas de CCR com 200 kg/m ³ de cimento	81
Tabela 15 - Dimensões do CP prismático segundo a NBR 5738	88
Tabela 16 - Equações para ajuste das curvas de compactação	100
Tabela 17 - Resultados do ensaio de compactação	100
Tabela 18 - Propriedades físicas das misturas de CCR	102
Tabela 19 - Resultados de RCS para misturas com 120 kg/m ³ de cimento	104
Tabela 20 - Resultados de RCS para misturas com 200 kg/m ³ de cimento	105
Tabela 21 - Porcentagens que a RCS das misturas com 120 kg/m ³ representam de RCS das misturas com 200 kg/m ³	105
Tabela 22 - Resultados de RTD para as misturas	112
Tabela 23 - Resultados para o ensaio de RTF	116

Tabela 24 - Resultados de Módulo de elasticidade aos 28 dias	119
Tabela 25 - ANOVA para misturas de CCR com 120 kg/m ³ de cimento	121
Tabela 26 - ANOVA para misturas de CCR com 200 kg/m ³ de cimento	122
Tabela 27 - Sumário das relações lineares entre propriedades físicas dos CCR no estado fresco	124
Tabela 28 - Sumários das relações entre as propriedades mecânicas.....	126
Tabela 29 - Sumários das relações lineares com propriedades físicas do CCR.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	-	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	-	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil
ABRELPE	-	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ARC	-	Agregado Reciclado de Concreto
ARI	-	Alta Resistência Inicial
ARM	-	Agregado de Resíduo Misto
ATE	-	Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período
ATR	-	Afundamento de Trilha de Roda
BGTC	-	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAD	-	Concreto de Alto Desempenho
CAF	-	Cimento de Alto Forno
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	-	<i>California Bearing Ratio</i>
CCA	-	Cinza da Casca de Arroz
CCR	-	Concreto Compactado com Rolo
CCT	-	Centro de Ciências Tecnológicas
CENPES	-	Centro de Pesquisas da Petrobrás
CONOMA	-	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPPE	-	Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro
CNT	-	Confederação Nacional de Transportes
CP	-	Corpo de prova
CPC	-	Cimento Portland Comum
DEC	-	Departamento de Engenharia Civil
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EGAF	-	Escória Granulada de Alto Forno
EM	-	Especificação de Material
ES	-	Especificação de Serviço
EUA	-	Estados Unidos da América
FEA	-	Escória de Forno Elétrico a Arco
FV	-	Fator de veículos
GC	-	Grau de compactação
GL	-	Graus de Liberdade
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	-	Instrução de Projeto
IPR	-	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	-	Índice de Suporte Califórnia
LMCC	-	Laboratório de Materiais de Construção Civil
ME	-	Método de Ensaio
MEAS	-	Massa Específica Aparente Seca Máxima
MF	-	Módulo de Finura
MeDiNa	-	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos

MR	- Módulo de Resiliência
MSR	- Metodologia de Superfície de Resposta
N	- Número equivalente de eixos
NBR	- Norma Brasileira
NM	- Norma Mercosul
PCA	- <i>Portland Cement Association</i>
PPGEC	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PMSP	- Prefeitura Municipal de São Paulo
RCC	- Resíduos da Construção Civil
RCD	- Resíduos da Construção e Demolição
RCS	- Resistência à Compressão Simples
RS	- Resistente a Sulfatos
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
RTD	- Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTF	- Resistência à Tração na Flexão
SisPav	- Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos
TSCE	- Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas
UDESC	- Universidade do Estado de Santa Catarina
USACE	- <i>United States Army Corps of Engineers</i>
VeBe	- V. Bahrner: criador do consistômetro para concretos secos que leva a abreviação de seu nome
VMD	- Volume Médio Diário de veículos
XLPE	- Polietileno Reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

km	-	Quilômetros
Kg/hab	-	Quilogramas por habitante
MPa	-	Mega Pascal
$D_{máx}$	-	Diâmetro máximo
mm	-	Milímetro
μm	-	Micrometro
f_{ctm}	-	Resistência característica média do concreto à tração
a/c	-	Relação água/cimento
C	-	Consumo de cimento
Vv	-	Volume de vazios
γ_c	-	Massa específica do cimento
γ_{agt}	-	Massa específica total dos agregados
m	-	Quantidade total de agregados por quantidade de cimento
h	-	Teor de umidade da mistura
$\pm$	-	Mais ou menos
kg/m ³	-	Quilogramas por metro cúbico
m ³	-	Metro cúbico
s/a	-	Taxa de proporção do agregado miúdo pelo agregado graúdo
N	-	Energia normal de compactação
I	-	Energia intermediária de compactação
M	-	Energia modificada de compactação
kgf.cm/cm ³	-	Quilograma força vezes centímetro por centímetro cúbico
cm	-	Centímetro
kg	-	Quilograma
cm ³	-	Centímetro cúbico
E_p	-	Energia potencial
P	-	Massa do soquete
h	-	Altura de queda do soquete
n_g	-	Número de golpes do soquete por camada
n_c	-	Número de camadas
V	-	Volume do corpo de prova
kN/m ³	-	Quilonewton por metro cúbico
GPa	-	Giga Pascal
R^2	-	Coeficiente de determinação de uma equação de regressão
sd	-	Desvio-padrão
f_r	-	Resistência à tração na flexão
f_c	-	Resistência à compressão
d	-	Tempo de cura
f_{sp}	-	Resistência à tração por compressão diametral
N_f	-	Número de repetições de cargas
RT	-	razão entre a máxima tensão de tração na flexão que ocorre na fibra mais tracionada do corpo de prova e a resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias
$f_{ck,est}$	-	Resistência característica do concreto, estimada à compressão
f_{ck}	-	Resistência característica de projeto do concreto à compressão
E	-	Módulo de elasticidade

n^o	- Número
g	- grama
g/cm ³	- Grama por centímetro cúbico
MR _{mín}	- Limite inferior do módulo de resistência
MR _{máx}	- Limite superior do Módulo de resiliência
Di	- Consumo de vida de fadiga acumulado no mês
k_1	- Coeficiente da regressão
k_2	- Coeficiente da regressão
%RF	- Relação entre tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão aos 28 dias
MF	- Módulo de Finura
f_c	- Resistência à compressão
F	- Força máxima aplicada
D	- Diâmetro do corpo de prova
π	- Pi
N	- Newton
$f_{ct,sp}$	- Resistência à tração por compressão diametral
l	- Comprimento do corpo de prova
P	- Carga aplicada
d	- Dimensão básica do corpo de prova
ℓ	- Distância entre apoios do corpo de prova prismático
Ω	- Ohm
E_s	- Módulo de elasticidade secante
$\sigma_{40\%}$	- Tensão correspondente a 40% da tensão de ruptura
$\varepsilon_{40\%}$	- Deformação correspondente a 40% da tensão de ruptura
H0	- Hipótese nula
H1	- Hipótese alternativa
α	- Nível de significância
y	- Variável resposta
β_0	- Coeficiente linear
β_1	- Coeficiente angular
x	- Variável preditora
P valor	- Probabilidade de significância
p	- Porosidade
D	- Densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivo geral	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	24
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	26
2.1 O PAVIMENTO E SUA ESTRUTURA.....	26
2.2 O CONCRETO COMPACTADO COM ROLO	27
2.2.1 Os insumos utilizados para produzir CCR.....	28
<i>2.2.1.1 Agregados para CCR</i>	<i>29</i>
<i>2.2.1.2 Água de amassamento</i>	<i>30</i>
<i>2.2.1.3 Aglomerantes para CCR</i>	<i>30</i>
<i>2.2.1.4 Aditivos para CCR.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.1.5 Adições minerais.....</i>	<i>32</i>
2.2.2 Dosagem de CCR	32
<i>2.2.2.1 O método de compactação dos solos aplicado ao CCR.....</i>	<i>33</i>
<i>2.2.2.2 A importância do grau de compactação para o CCR.....</i>	<i>37</i>
<i>2.2.2.3 Energia de compactação das misturas</i>	<i>38</i>
2.2.3 Propriedades do CCR no estado fresco e no estado endurecido.....	40
2.2.4 Vantagens e desvantagens do uso de CCR para pavimentação	44
2.3 ALGUMAS PESQUISAS SOBRE CCR	45
2.3.1 Pesquisas sobre CCR com agregados naturais.....	45
2.3.2 Pesquisas sobre CCR com substituição dos agregados miúdos.....	47
2.3.3 Pesquisas sobre CCR com substituição dos agregados graúdos	49
2.4 O RESÍDUO DE CONCRETO	54

2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS	57
2.5.1 O Método do Dimensionamento Nacional de Pavimentos	61
3 METODOLOGIA	66
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS	67
3.1.1 Caracterização do ARC.....	68
3.1.2 Caracterização dos agregados miúdos.....	70
3.1.3 Caracterização dos agregados graúdos naturais	70
3.1.4 As características dos agregados empregados na pesquisa	71
3.2 DOSAGEM DAS MISTURAS DE CCR	75
3.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR	81
3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	82
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS.....	84
3.5.1 Ensaio de resistência à compressão simples	85
3.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	85
3.5.3 Ensaio de resistência à tração na flexão.....	86
3.5.4 Módulo de elasticidade	90
3.5.5 Massa específica, absorção de água e índice de vazios	91
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	91
3.6.1 Análise de Variância.....	92
3.6.2 Análises de regressão linear simples.....	93
3.7 DIMENSIONAMENTO DE SEÇÕES DE PAVIMENTO	94
3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SEÇÕES DE PAVIMENTO	96
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	98
4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR	98
4.2 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS.....	102
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	103
4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	111

4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	115
4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE	118
4.7 ANOVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CCR	121
4.8 RELAÇÕES LINEARES DAS PROPRIEDADES DAS MISTURAS.....	123
4.9 AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DAS SEÇÕES DE PAVIMENTO	129
5 CONCLUSÕES	135
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
REFERÊNCIAS.....	140

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país extenso e o modal de transporte mais explorado é o rodoviário, o qual chega a representar 61% da matriz de transportes de cargas e 95% de pessoas, de acordo com o Relatório gerencial de 2019 da Confederação Nacional de Transportes (CNT). Além disso, o país possui 1.720.700 km de rodovias, sendo que desse total, somente 12,4% são pavimentadas, 9,1% planejadas e 78,5% constituem rodovias não pavimentadas (CNT, 2019). Balbo e Dornelas (2015) elucidaram que o setor rodoviário enfrenta uma crise anunciada desde a década de 1980, provocada por dois fatores: carência de vias pavimentadas e qualidade da pavimentação. Considerando a grande porcentagem de rodovias não pavimentadas, percebe-se que há um amplo campo de trabalho para o aprimoramento das rodovias brasileiras que, em geral, são precárias e afetam negativamente o desenvolvimento do país.

Ante a evidente necessidade de melhoria da malha rodoviária brasileira, evidencia-se também uma grande demanda por insumos para pavimentação. Os materiais naturais representam um recurso finito no planeta, sua exploração demasiada acarreta danos ambientais irreversíveis e, portanto, novas possibilidades de utilização de materiais devem ser estudadas. Como por exemplo, a utilização de resíduos sólidos como insumos para pavimentação, tendo em vista a grande disponibilidade desses materiais. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o montante de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) representa 78,4 milhões de toneladas no Brasil, e aproximadamente 6,9 milhões de toneladas desses resíduos não foram coletados em 2017. Além disso, dos 71,6 milhões de toneladas coletados de RSU, cerca de 42,3 milhões de toneladas (59,1%) foram dispostos em aterros sanitários, e o restante (40,9%), estimou-se que tenha sido depositado em locais inadequados (ABRELPE, 2017).

Se for levado em consideração que a média de produção de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) no Brasil, segundo Pinto (1999) é de 500 kg/hab e, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o país possui uma população próxima a 210 milhões de habitantes, pode-se estimar que há uma produção de 875.000.000 m³ de RCD anualmente. Isso, ao se considerar um valor médio de massa específica do resíduo igual a 1200 kg/m³ e a produção de resíduo igual àquela estimada por Pinto em 1999.

A disposição irregular de resíduos sólidos, segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), tem causado inúmeras consequências para sociedade. Como exemplos, pode-se elencar as enchentes, a perda de infraestrutura de drenagem por entupimentos, o assoreamento de canais, a poluição em si, o aumento de custos para administração pública, a proliferação de vetores epidemiológicos etc. (ABRECON, 2015).

Por outro viés, é do senso comum que o desenvolvimento urbano, a modernização, a industrialização e a globalização são considerados efeitos positivos para economia de uma sociedade. Entretanto as consequências desses “progressos” podem ser demasiadamente danosas ao meio ambiente. A ABRECON (2015) confirmou que o desenvolvimento e o crescimento dos centros urbanos tendem a ocasionar um notório problema à sociedade: a produção de resíduos sólidos. E devido a isso, alternativas que visem mitigar problemas ambientais, decorrentes da má gestão de resíduos, devem ser estudadas com o intuito de justapor o desenvolvimento econômico e ambiental. Uma plausível alternativa a ser avaliada diz respeito ao alinhamento da melhoria da malha rodoviária brasileira com a utilização de RSU, como possíveis materiais de insumo para pavimentação.

Desse modo, os RSU, ou melhor, de modo mais específico, os RCD poderiam ser utilizados como agregados para produção de materiais para pavimentação em quaisquer tipos de materiais, desde misturas com solo até as asfálticas. Se comprovada a eficiência desse tipo de insumo quando aplicado em camadas de pavimentos, conforme os requisitos técnicos estabelecidos pelas normas rodoviárias vigentes. Ademais, é evidente a utilização de agregados reciclados em concretos dos mais variados tipos para diferentes empregos em obras civis. Logo, após avaliar um tipo de concreto, dosado com agregado reciclado, aplicável à camada de pavimento (preferencialmente na base), estariam sendo alinhados, nessa perspectiva, a questão de melhoria da malha rodoviária brasileira com a redução de danos ao meio ambiente, decorrentes da extração de agregados naturais.

A problemática referente à redução de danos ambientais é pertinente à diminuição do uso de agregados naturais em obras civis. Já a utilização de uma base cimentada na estrutura de uma seção de pavimento refere-se à melhoria da malha rodoviária. Afinal, teoricamente se espera que a utilização desse tipo de material na base melhore a capacidade do pavimento de resistir aos esforços de tração. Isso porque, de modo geral, os revestimentos são submetidos aos esforços de compressão

e tração devido à flexão, enquanto as camadas subjacentes resistem à compressão. Nesse caso, ao se dimensionar uma camada estabilizada quimicamente ou cimentada, sob uma camada asfáltica, garante-se melhor coesão entre as camadas do pavimento, aumentando sua rigidez. Assim, a base do pavimento pode não apenas resistir aos esforços de compressão, mas também aos esforços de tração na flexão decorrentes do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Portanto, um pavimento semirrígido, em que a base foi dimensionada com um material cimentado, apresenta maior capacidade de resistir aos esforços de tráfego, reduzindo os efeitos de danos por fadiga dos materiais e afundamento por trilha de roda na seção do pavimento (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; RITH; KIM; LEE, 2018).

Os materiais cimentados que mais frequentemente são empregados em obras brasileiras de pavimentação, são: Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento e o Concreto Compactado com Rolo (CCR) (BERNUCCI *et al.*, 2008). Sendo esse último, um material bastante versátil, que facilmente aceita adições ou substituições de agregados por resíduos. Além disso, o CCR não apresenta elevado consumo de cimento, inferindo ainda, economia para obra e menor dano ao meio ambiente. Balbo (2009) reiterou que dada a simplicidade construtiva e durabilidade do CCR, esse material tem sido largamente empregado como base de pavimentos.

Assim, considerando as hipóteses de utilização de resíduos como insumo para CCR e o emprego desse tipo de concreto na base de um pavimento semirrígido, espera-se que: a seção de pavimento apresente maior capacidade de resistir aos esforços do tráfego; reduza-se o volume de insumos naturais para a produção de CCR; seja possível aprimorar a malha rodoviária brasileira com a utilização desse material.

1.1 JUSTIFICATIVA

Admitindo a necessidade brasileira de desenvolvimento da infraestrutura da malha rodoviária, esta pesquisa justificou-se pelo primordial intuito de aliar desenvolvimento tecnológico e ambiental, seja pelo simples fato de estudar o comportamento do resíduo de concreto como agregado gráudo para concepção de

camadas de pavimentos, como também, pelo fato de destinar resíduos sólidos em substituição aos agregados naturais, os quais constituem recursos finitos do Planeta.

Levando-se em consideração que a porcentagem de agregados na mistura de concreto é próxima a 80% do volume total de materiais (HARRINGTON *et al.*, 2010), torna-se importante pesquisar materiais alternativos capazes de substituir os agregados naturais, sem significativas perdas das propriedades do concreto. Além disso, devido ao fato de que os agregados naturais não são recursos renováveis e de haver dificuldade em se implantar novas jazidas por conta das restrições ambientais, esta pesquisa se justifica como uma alternativa para solução desse problema.

Por isso, é importante pesquisar a aplicabilidade do Agregado Reciclado de Concreto (ARC) como insumo para pavimentação, tendo em vista que a infraestrutura rodoviária demanda um grande volume de materiais para execução de obras. Após a trituração desse resíduo, ele poderia ser adicionado ao CCR para execução de camadas de pavimentos, haja vista que esse tipo de concreto facilmente aceita a incorporação de materiais alternativos, como sustentam Andrade (1997) e Silva (2006). De certo modo, é importante delimitar a empregabilidade de tal resíduo, pois sendo possível a sua utilização, sem reduções significativas das propriedades mecânicas do concreto, reduzir-se-ia a utilização de matérias-primas, ou até mesmo, o desperdício delas. Nessa lógica, ao se propor outra possibilidade de destinação ao resíduo, estar-se-ia minimizando danos ao meio ambiente, levando em consideração que em determinados casos, os ARC não recebem um tratamento adequado, são descartados em aterros ou destinados a outros fins, mais prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, segundo Balbo (2009, p. 70) “na atualidade, há grande necessidade de reutilização de materiais reciclados, como entulhos de demolição e construção”.

Teoricamente, o principal benefício do reaproveitamento do resíduo do concreto seria em relação às questões ambientais. Todavia, é interessante verificar se esses benefícios também seriam perceptíveis em outras áreas, como a econômica ou mesmo, a técnica, ao se pressupor uma melhoria nas propriedades do CCR devido à incorporação desse tipo de agregado reciclado.

Além disso, ao se empregar o CCR na camada de base de pavimentos, otimiza-se a capacidade de suporte da seção, aumentando a resistência aos efeitos decorrentes da fadiga dos materiais e se reduz os efeitos de afundamento de trilha de roda (BERNUCCI *et al.*, 2008; RITH; KIM; LEE, 2018). Assim, o uso de CCR na base

também permite que a seção de pavimento suporte maiores volumes de tráfego, os quais correspondem ao meio pesado (10^6) ou pesado (10^7), de acordo com Balbo (2007).

Outro fator que justifica a realização desta pesquisa refere-se à utilização de um método empírico-mecanicista para dimensionamento de seções de pavimento e a previsão de danos nas seções dimensionadas, decorrentes do tráfego. Tal método encontra-se em fase de implantação no Brasil. Mattos (2014) cita que em outros países, como África do Sul, Alemanha, Austrália, França, Estados Unidos da América (EUA) e Reino Unido já há metodologias mecanicistas para dimensionamento e previsão de tensões e deformações de pavimentos. O emprego de uma abordagem empírico-mecanicista em detrimento de um dimensionamento empírico (com base no resultado de CBR, por exemplo) visa, de acordo com Medina e Motta (2015), melhorar recursos de projeto, compatibilizar os materiais e testar diferentes combinações a fim de reduzir custos e tempo de construção.

Os Métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos ainda são extensamente utilizados no Brasil, mas essa abordagem é bastante simplória, até mesmo ultrapassada tecnologicamente e, considerando a contemporaneidade do método mecanicista no Brasil, é de grande importância à pesquisa de materiais rodoviários, simular o comportamento mecânico desses materiais, aplicados em camadas de pavimento. Portanto, dentro do contexto desta pesquisa, o método empírico-mecanicista de dimensionamento de pavimentos brasileiros será utilizado para simular condições de tráfego para identificar a aplicabilidade dos materiais dosados e testados no programa experimental e seu atendimento ou não às normativas rodoviárias.

Então, esta pesquisa é justificada sob três aspectos distintos e complementares entre si: o estudo de um resíduo como insumo para CCR, com o intuito de resguardar a utilização excessiva e o desperdício de materiais naturais; a possibilidade de se melhorar parte da malha rodoviária brasileira ao se empregar o CCR com ARC na base de pavimentos semirrígidos, sob ação de alto tráfego de veículos; e a utilização do dimensionamento empírico-mecanicista para avaliar o desempenho predito do material pesquisado na base de pavimentos e o atendimento aos requisitos das normas rodoviárias vigentes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação constitui-se em aferir as propriedades mecânicas do concreto compactado com rolo, dosado com agregado reciclado de concreto, para emprego em camadas de base de pavimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- dosar uma mistura referência de CCR com agregados naturais e misturas de CCR com substituição de frações dos agregados naturais por ARC, em massa;
- aferir o desempenho mecânico do CCR com adição do resíduo para base de pavimentos, em comparação ao traço usual de CCR, sem adição do resíduo;
- analisar, estatisticamente, a influência da adição do ARC nas propriedades mecânicas do CCR;
- avaliar, a partir da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), o afundamento de trilha de roda e a porcentagem de área trincada estimada do pavimento no fim do período de projeto de seções de pavimentos que utilizam a base em CCR com ARC, dimensionadas a partir de uma abordagem empírico-mecanicista.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, introduz-se o tema da pesquisa, destacando sua pertinência e delineando os objetivos a serem atingidos.

No capítulo 2, é apresentado os conceitos relativos ao tema da pesquisa, os quais servem ao mesmo tempo de norteadores metodológicos e posteriormente de fonte de dados para comparações de resultados entre pesquisas acerca de CCR.

Além disso, encontram-se neste capítulo uma breve introdução ao conceito de pavimento e sua estrutura; ponderações de outros autores sobre a utilização do CCR para pavimentação; a delimitação do uso de agregado reciclado de concreto na pavimentação e uma breve introdução ao surgimento e utilização do novo método mecanicista para dimensionamento de pavimentos brasileiros.

No capítulo 3, tem-se a descrição dos materiais e métodos adotados para execução dos experimentos desta pesquisa. Portanto, nele são explanados os ensaios referentes às caracterizações dos materiais, as etapas de dosagem das misturas de CCR e de aferição das propriedades mecânicas desse tipo de concreto. Também são abordadas as particularidades observadas para o dimensionamento de seções de pavimento e como foram tratados estatisticamente os resultados do programa experimental e dos dimensionamentos através do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa).

Os resultados e discussões referentes aos ensaios laboratoriais conduzidos acerca de CCR estão apresentados no Capítulo 4. Neste capítulo, são comparados os resultados das propriedades mecânicas do CCR desta pesquisa com os resultados de outras pesquisas e observado se há atendimento às normas rodoviárias vigentes. Além disso, são relatados os resultados obtidos nos dimensionamentos do MeDiNa e avaliadas as seções dimensionadas.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões alcançadas a partir dos resultados, comparações e análises realizadas durante o processo de construção desta dissertação. Neste capítulo também são apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos norteadores da pesquisa. Conceitos os quais estão ligados à estrutura do pavimento, ao CCR e suas particularidades como material para pavimentação, ao ARC e suas possíveis aplicações como insumo para pavimentação e às metodologias de dimensionamento de pavimentos.

2.1 O PAVIMENTO E SUA ESTRUTURA

“O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego” (BALBO, 2007, p. 35). Bernucci *et al.* (2008) ressaltaram que além dos esforços do tráfego, o pavimento deve também resistir aos esforços do clima e proporcionar ao usuário melhoria nas condições de rolamento, conforto, economia e segurança. Além disso, “Uma seção transversal típica de um pavimento – com todas as camadas possíveis – consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos métodos de dimensionamento” (SENÇO, 2008, p. 15).

A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, embora isso não seja tomado como regra geral. Para que funcione adequadamente, todas as peças que a compõem devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, isto é, de modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas do pavimento (BALBO, 2007, p.35).

De modo geral, os pavimentos são classificados como flexíveis, semirrígidos e rígidos, de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006a). Sendo diferenciados da seguinte maneira: flexível, quando todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas, mediante carregamento e as parcelas de carga são distribuídas entre as camadas, de modo próximo à equivalência, ou seja: cada camada do pavimento flexível absorve significativas solicitações decorrentes do tráfego; semirrígidos, quando a base é constituída por um material cimentado e o revestimento por um material asfáltico, as deformações

decorrentes da absorção de cargas do tráfego restringem-se, em maior porcentagem nas camadas de revestimento e base; e rígido quando o revestimento apresenta elevada rigidez em relação às camadas inferiores, de certo modo, boa parte das tensões são absorvidas pelo revestimento, nesse caso.

Bernucci *et al.* (2008) apontaram a BGTC, o solo-cal, o solo-cal-cimento, o solo-cimento e o CCR como os materiais cimentados mais frequentemente usados, no Brasil, como materiais de base, sub-base e reforço do subleito. Com a utilização desses materiais, em uma das camadas do pavimento, alcança-se maior rigidez da seção e alivia-se o revestimento de resistir exclusivamente aos esforços de tração na flexão.

2.2 O CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Por questões de nomenclatura, Balbo (2007, p. 203) explicitou que:

A expressão *concreto magro*, que era empregada para o material na década de 1970, foi cunhada a partir do inglês *lean concrete*, terminologia ainda empregada no Reino Unido. No Brasil, esse tipo de concreto passou por uma fase nos anos 1980 em que era denominado *concreto pobre rolado*, tendo sido posteriormente difundida nos países de língua inglesa a expressão *concreto compactado com rolo*, bem mais precisa que as anteriores (*rolled compacted concrete*).

Andriolo e Sgarboza (1993) citaram que o conceito de concreto rolado foi provavelmente divulgado em março de 1976 nas Conferências de Asilomar, Califórnia, EUA, quando foram apresentados trabalhos referentes ao tema. Balbo (2009) afirmou que a origem do CCR remete ao Reino Unido, ao fim da 2ª Guerra Mundial e que seu avanço se deu na década de 1970. “Na área de pavimentação rodoviária, o CCR também tem desempenhado um papel importante desde a década de 80, quando seu uso teve avanço expressivo no Brasil, seguindo o que acontecia em outros países” (SACHET, 2012, p.1).

O concreto compactado com rolo “[...] é resultado da necessidade de se projetar barragens de concreto que pudessem ser construídas mais rápida e economicamente, em relação àquelas onde se empregam os métodos construtivos convencionais” (ANDRIOLO, 1989, p. 14).

Esse material é caracterizado por apresentar consistência seca (sem abatimento no ensaio de tronco de cone), com tal trabalhabilidade que permita a

compactação por rolos compressores ou vibratórios (VALENCIA, 1999; DNIT, 2004; MEDINA; MOTTA, 2015), ou seja, para devida consolidação, o CCR deve ser seco o suficiente para suportar o peso do equipamento e úmido o bastante para aceitar que a pasta de cimento seja espalhada uniformemente (ANDRIOLO; SGARBOZA, 1993; HARRINGTON *et al.*, 2010; NEVILLE; BROOKS, 2013). De modo análogo, a Norma Brasileira (NBR 16312-1) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014, p.1) define o CCR como “técnica construtiva composta de um concreto dosado de forma que, em seu estado fresco, seja capaz de suportar o peso de um rolo vibratório e compactador no momento do adensamento”.

Logo, a principal diferença entre o CCR e o concreto convencional, além do método de assentamento, é em relação à trabalhabilidade e consistência (ANDRIOLO, 1989; RIBEIRO; ALMEIDA, 2000). Para concepção do CCR, o consumo de cimento pode variar de 80 kg/m³ a 380 kg/m³, sendo usado para revestimento no último caso (BALBO, 2007). Senço (2008, p. 442) inferiu que:

[...] o teor de cimento estaria entre os teores da brita graduada tratada com cimento por metro cúbico de concreto, para bases de pavimentos e em torno de 150 a 250 quilogramas de cimento por metro cúbico para revestimento. A resistência à compressão simples da mistura utilizada no concreto rolado utilizado como base varia entre 2,5 e 13 MPa – aos sete dias de cura [...].

Ricci (2007) destacou que a aplicação do CCR é bastante usual em base de pavimentos de concreto, seguida por base de pavimentos asfálticos e, posteriormente em revestimentos. Ele também pode ser empregado como base de pavimentos com peças pré-moldadas de concreto, exemplo de pavimentos intertravados. Balbo (2009) ressaltou que pavimentos de concreto simples podem ser construídos com CCR desde que sejam tomados cuidados especiais com o acabamento superficial, haja vista que esse material não apresenta uma boa regularidade como o concreto de cimento Portland vibrado. Deste modo, revestimentos com CCR podem causar desconforto ao usuário ou até mesmo reduzir condições de aderência pneu-pavimento.

2.2.1 Os insumos utilizados para produzir CCR

Os materiais constituintes do CCR não diferem daqueles comumente empregados na produção de concreto convencional. Portanto, são utilizados o

agregado, a água, o cimento Portland e, eventualmente, pode-se utilizar um aditivo ou alguma adição mineral (VALENCIA, 1999; SENÇO, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2.1.1 Agregados para CCR

A porcentagem de agregados, em volume, na mistura de CCR, está próxima a 80% (VALENCIA, 1999; HARRINGTON *et al.*, 2010; RAO *et al.*, 2016), sendo, portanto, a matéria-prima mais consumida para execução desse tipo de concreto. Ricci (2007) apontou que os agregados devem ser provenientes de rochas de boa qualidade que atendem às características físicas e químicas normatizadas e que estejam isentos de materiais nocivos, como matéria orgânica e torrões de argila. Além disso, é comum a totalidade de agregados da mistura de CCR ser uma composição de uma ou mais frações de agregado graúdo com agregado miúdo para se alcançar uma curva granulométrica com melhor distribuição. Balbo (2007) inferiu que o agregado miúdo, passando pela peneira de 4,75 mm, poderá ser a areia ou ainda pedrisco, o que não é comum para concretos convencionais.

Senço (2008, p. 442) denotou que “os fragmentos de rocha devem apresentar uma resistência ao desgaste, no ensaio de Abrasão Los Angeles, inferior a 40%”. Não obstante, Andrade (1997) apontou que em estudos de dosagens, o Diâmetro máximo ($D_{\text{máx}}$) dos agregados poderá ser igual a 38 mm, 50 mm, 64 mm ou 76 mm. Quanto a isso, Mehta e Monteiro (2014) afirmaram que agregados com diâmetro maior que 76 mm raramente são empregados devido aos problemas que podem ocorrer durante o espalhamento e compactação da mistura, enquanto o uso de material mais fino que 75 μm produz uma mistura mais coesiva devido ao preenchimento dos vazios, desde que não exceda 10% do peso total da mistura. O DNIT (2004) recomenda que a dimensão máxima característica do agregado não exceda o valor de um terço da espessura do pavimento ou 50 mm, devendo ser adotado o menor valor. A NBR 16312-2 (ABNT, 2015) recomenda que o agregado graúdo seja composto de dimensões máximas características entre 19 mm e 50 mm.

Perante essa variação de $D_{\text{máx}}$, é comum em pesquisas, delimitar a dimensão máxima característica do agregado graúdo natural, reciclado ou artificial, em 25 mm (RICCI, 2007; PINTO, 2010) ou 19 mm (TRICHÊS, 1993; SACHET, 2012; BORRÉ, 2017; SHAMSAEI; AGHAYAN; KAZEMI, 2017).

Por fim, quanto à seleção apropriada de uma curva granulométrica para o CCR, ela deve ser realizada com o intuito de reduzir a potencial ocorrência de segregação do material e aprimorar suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, e aumentar a durabilidade do mesmo (HARRINGTON *et al.*, 2010).

2.2.1.2 Água de amassamento

“A água a ser utilizada no ‘Concreto Rolado’ não exige requisitos diferentes da água normalmente utilizada nos concretos convencionais, massa e estrutural” (ANDRIOLO, 1989, p. 98). Assim sendo, ela “[...] deve ser isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento. Pressupõem-se adequadas as águas potáveis” (RICCI, 2007, p. 35), embasado na norma DNER-EM 034 (DNER, 1997b).

2.2.1.3 Aglomerantes para CCR

De acordo com Senço (2008), o cimento comumente empregado na concepção do CCR é o Cimento Portland Comum (CPC), podendo ser empregados outros cimentos, quando houver interesse, como: cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), Cimento de Alto Forno (CAF) ou Cimento Pozolânico. Destarte, “o ‘Concreto Rolado’ pode ser dosado com qualquer tipo de cimento, e material pozolânico, que atenda aos requisitos para uso no concreto convencional” (ANDRIOLO, 1989, p.96). Não obstante, o DNIT (2004) ressaltou que o cimento Portland pode ser de qualquer tipo, desde que sejam observadas as exigências da norma DNER-ME 036.

A escolha de um cimento em detrimento de outro deve considerar os requisitos estruturais e de durabilidade, jamais o método de lançamento ou de compactação, como afirmou Andriolo (1989). Em contrapartida, Ricci (2007) lembrou que em um país de grandes proporções como o Brasil, cabe ainda ter cuidado com a disponibilidade do cimento escolhido para o local da obra, haja vista que em diferentes regiões brasileiras, são produzidos diferentes cimentos. Segundo Mehta e Monteiro (2014) o cimento selecionado para a obra deve também apresentar baixo calor de hidratação, especialmente quando se emprega o CCR em obras hidráulicas.

Nas pesquisas acerca de CCR, muitos autores dão preferência ao emprego de determinado tipo de cimento devido à facilidade de obtê-lo no comércio local. O

cimento do tipo CP II E 32 foi utilizado por Trichês (1993¹) para produção de todas as misturas de CCR, e por ABREU (2002) somente para a mistura com consumo de cimento igual a 300 kg/m³. O cimento CP III 40 RS foi empregado por Ricci (2007), Pinto (2010) e Sachet (2012). Enquanto o CP II F 32 foi utilizado por Hasparyk *et al.* (2003), Ribeiro (2010) e Borré (2017). Abreu (2002) também estudou traços de CCR com o cimento do tipo CP V ARI, bem como Della Vecchia (2013), Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) e Toffolo (2015). Graça *et al.* (2005) utilizaram o CP III 32 e Silva (2006) empregou o cimento CP II Z 32.

2.2.1.4 Aditivos para CCR

Senço (2008) afirmou que havendo necessidade, pode-se recorrer ao uso de aditivos no CCR, geralmente visando o retardamento de pega para aumentar o tempo de trabalhabilidade. De acordo com Chhorn e Lee (2018), uma mistura de CCR pode encontrar-se num estado muito seco para ser compactada e para estender o tempo de trabalhabilidade, um aditivo pode ser requerido.

Mehta e Monteiro (2014, p. 616) afirmaram que:

Aditivos incorporadores de ar e redutores de água são utilizados nas dosagens de CCR que contêm um maior volume de pasta. Aditivos retardadores de pega podem prolongar o tempo até que a camada de concreto permaneça não endurecida, reduzindo o risco de juntas frias com a camada subsequente. No entanto, em misturas para CCR de consistência seca, os aditivos químicos apresentam uma eficiência limitada.

Harrington *et al.* (2010) ressaltaram que a seleção de aditivos para o CCR deve envolver um estudo preliminar acerca do tipo a ser utilizado, da efetividade do produto e da quantidade a ser incorporada à mistura. Essa análise prévia deve considerar a natureza seca do CCR, material que acaba requerendo maiores quantidade de aditivos para se alcançar o efeito desejado, quando comparado ao concreto convencional.

¹ Na época em que o autor desenvolveu sua pesquisa, o cimento atualmente denominado CP II-E-32 era nomeado como CP E-32.

2.2.1.5 Adições minerais

Adições minerais, segundo Mehta e Monteiro (2014), são bastante empregadas em misturas de CCR. O uso de quantidades demasiadas delas pode reduzir a temperatura adiabática do concreto, como pode também elevar a durabilidade do material.

Silva (2006) afirmou que uma peculiaridade do CCR é referente à possibilidade de se empregar insumos não convencionais com características cimentícias nesse tipo de concreto. Dentre os exemplos, o autor elencou a cinza volante, a sílica ativa e outros materiais pozzolânicos já estudados como adições ao concreto convencional.

2.2.2 Dosagem de CCR

“Um dos princípios básicos da dosagem de massa é obter misturas com maior volume absoluto de agregados para o menor consumo possível de cimento de modo a atender as propriedades requeridas” (ANDRIOLO, 1989, p. 99). A dosagem do CCR, de acordo com Andrade (1997) e Silva (2006), normalmente é executada pelo método do menor volume de vazios, o qual consiste em estabelecer a melhor proporção possível em relação à distribuição granulométrica dos agregados para se obter o menor índice de vazios no concreto.

Com o objetivo de definir a proporção dos materiais necessários na composição de concretos para base ou sub-base de pavimento, Ricci (2007) afirmou que os métodos de dimensionamento devem alcançar a composição mais econômica, compatibilizando materiais disponíveis, equipamentos de execução, condições de obras existentes e não menosprezando as exigências de cálculo e de vida útil previstas.

Para Balbo (2007, p. 204):

A dosagem do CCR deve ser realizada seguindo-se dois princípios: a tecnologia de compactação (solos) e a tecnologia de concreto no que diz respeito às resistências a serem atingidas pelo material. Portanto, os ensaios de compactação irão definir a umidade ótima de mistura dos agregados com o cimento, o que será seguido, após a cura das amostras, de medidas de resistência do CCR.

Mehta e Monteiro (2014) delimitaram duas abordagens distintas para a dosagem do CCR: a primeira, embasada nos princípios de compactação do solo, que considera a umidade ótima e a densidade seca máxima da mistura para se obter o concreto rolado; a segunda, fundamentada nos métodos de tecnologia do concreto, em que é importante reduzir o fator água/cimento (a/c) para se alcançar melhores resistências do material.

Harrington *et al.* (2010) diferenciaram quatro métodos de dosagem do CCR: o método da consistência do concreto; o modelo de suspensão sólida; o método do volume de pasta ótima; e o método de compactação dos solos. O método da consistência utiliza como um dos parâmetros, o nível de consistência da pasta, aferido através do consistômetro VeBe², e é usualmente empregado para estruturas hidráulicas. O modelo de suspensão sólida é usado para determinar as proporções dos materiais secos empregados na mistura e se calcular a quantidade de água necessária para preencher completamente os vazios entre os materiais secos, além de que os parâmetros desses materiais devem ser previamente conhecidos e simulações computacionais confiáveis podem ser executadas para esse modelo, especialmente quando há necessidade de ajustes de dosagens. O método do volume de pasta ótima baseia-se no conceito de que a pasta de cimento seja suficiente para preencher todos os vazios da mistura de CCR. E por fim, o método de compactação de solos, o qual é amplamente utilizado e busca estabelecer uma relação entre a densidade e teor de umidade para se alcançar uma mistura de CCR compactada na máxima densidade seca.

2.2.2.1 O método de compactação dos solos aplicado ao CCR

O método de compactação do CCR, embasado na tecnologia de compactação dos solos, é de comum aplicação em projetos de pavimentação nos EUA (HARRINGTON *et al.*, 2010; CHHORN; HONG; LEE, 2017). Em sua metodologia, é desprezado o conceito convencional de reduzir o fator a/c do concreto para se obter maior ganho de resistência à compressão, haja vista que essa propriedade do material em seu estado endurecido será alcançada em decorrência da compactação da mistura no estado fresco (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

² Referente ao seu criador sueco, V. Bahrner. É um equipamento potente para vibração de concretos muito secos.

Esse método consiste, sequencialmente, em: escolher uma distribuição granulométrica adequada dos agregados; selecionar o consumo de cimento da mistura; determinar a umidade ótima e a densidade seca máxima da mistura; selecionar amostras para aferir a resistência à compressão; e por fim, calcular as proporções de insumos para mistura (HARRINGTON *et al.*, 2010).

Essa metodologia assemelha-se àquela proposta por Trichês (1993), a qual foi também adotada nas pesquisas de Abreu (2002), Ricci (2007), Pinto (2010), Toffolo (2015) e Borré (2017). Inicialmente, deve-se definir a composição granulométrica dos agregados para um enquadramento na faixa granulométrica sugerida; em seguida, é fixado o consumo de cimento para que, em diferentes umidades, seja calculada a quantidade de agregados total pela quantidade de cimento em 1 m³, através da Equação 1; e, realizando o ensaio de compactação, determina-se o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima da mistura.

$$C = \frac{1000 - V_v}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{m}{\gamma_{agt}} + \frac{h(1+m)}{100}} \quad (1)$$

Sendo:

C = consumo de cimento (kg/m³);

V_v = volume de vazios (L);

m = quantidade de agregado total por quantidade de cimento (adimensional);

h = teor de umidade da mistura (%);

γ_c = massa específica do cimento (kg/m³);

γ_{agt} = massa específica do agregado total (kg/m³).

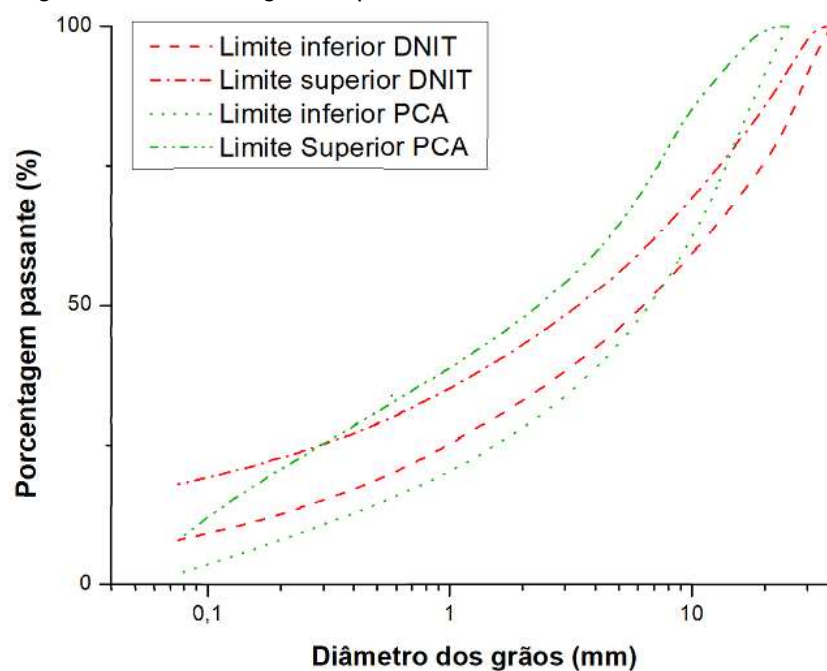
Quanto ao volume de vazios para aplicação na Equação 1, ele é adotado por tentativas, em referência a Abreu (2002), Silva (2006) e Borré (2017), esse valor foi adotado igual a 5%, ou seja, 50 litros em 1 m³ de CCR.

A faixa granulométrica comumente empregada para dosagens de CCR, em pesquisas brasileiras (ABREU, 2002; RICCI, 2007; PINTO, 2010; BORRÉ, 2017) foi proposta por Pittman e Ragan (1998), e assemelha-se à sugerida pela *Portland Cement Association* (PCA), citada por Harrington *et al.* (2010) e utilizada em diversas pesquisas, como as de Modarres e Hosseini (2014) e Chhorn e Lee (2018). Além

disso, também há a faixa sugerida pelo DNIT (2004). Assim, a Figura 1 apresenta as faixas granulométricas sugeridas pelo PCA e pelo DNIT.

Como a composição granulométrica é muito influenciada pela granulometria do agregado miúdo, Andrade (1997) recomenda que a porcentagem de vazios do agregado miúdo deve estar situada no entorno de $38\% \pm 1\%$, pois valores acima disso afetariam o teor de material cimentício, enquanto abaixo, ocorria interferência na trabalhabilidade da mistura.

Figura 1 - Faixas granulométricas sugeridas pelo PCA e DNIT



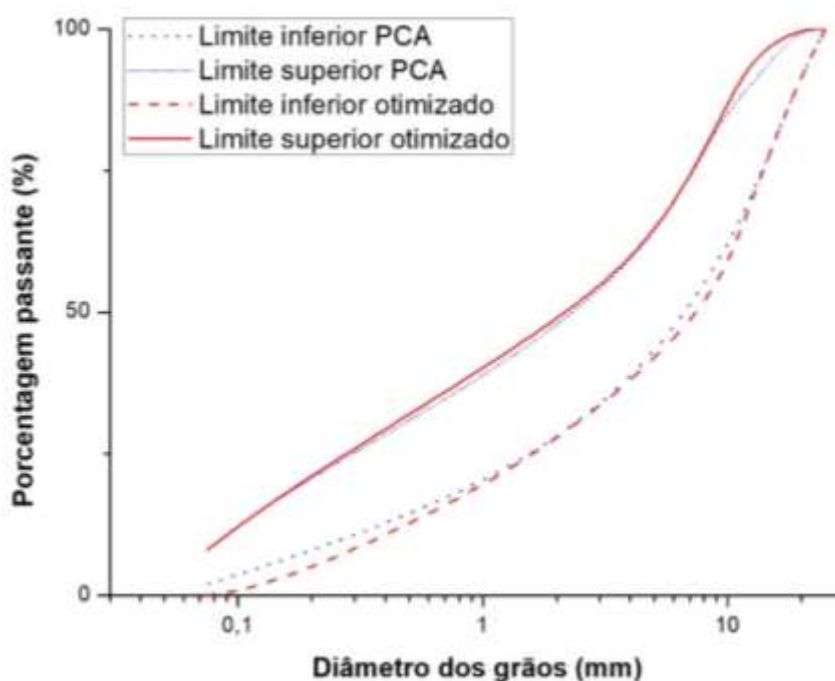
Fonte: adaptado de DNIT (2004) e Harrington *et al.* (2010).

Todavia, mesmo não atendendo rigorosamente aos requisitos de quaisquer faixas granulométricas sugeridas pela literatura, ainda se pode alcançar bons resultados de resistência à compressão das misturas de CCR. Em pesquisa acerca da influência de diversos fatores na resistência à compressão do CCR, Chhorn e Lee (2018) extrapolaram os limites da faixa granulométrica sugerida pelo PCA para verificar a influência da proporção de agregados (e por consequência, da distribuição granulométrica) na resistência à compressão do CCR. Os autores analisaram três graduações distintas de agregados com proporções de agregado miúdo/agregado graúdo (s/a) diferentes entre si, de tal modo que uma das curvas granulométricas dos agregados utilizados na mistura de CCR encontrava-se abaixo do limite inferior da faixa sugerida pelo PCA, com s/a = 30%, outra curva encontrava-se dentro dos limites

(s/a = 50%) e uma terceira encontrava-se acima do limite superior (s/a = 70%). Os resultados de resistência à compressão dos testemunhos às idades de 3, 7 e 28 dias, comprovaram que a curva granulométrica de s/a = 50% alcançou maiores valores de resistência à compressão, em todas as idades e as curvas dos CCR com s/a = 30% e s/a = 70% apresentaram resultados bastante similares em todas idades. Entretanto, não foi recomendada a utilização de uma distribuição granulométrica com poucos finos (s/a = 30%), ou seja abaixo do limite inferior da faixa granulométrica, porque isso pode interferir negativamente no desempenho mecânico da mistura.

Diante da percepção de que o não atendimento à faixa granulométrica sugerida pelo PCA ainda resultava em adequadas propriedades mecânicas para o CCR. O estudo de Chhorn e Lee (2018) reafirmou a empregabilidade da faixa otimizada, proposta por Chhorn, Hong e Lee (2017) (Figura 2), alegando que a otimização da faixa do PCA deveria ser empregada com intuito de melhorar a praticidade da construção e reduzir custos.

Figura 2 - Sugestão de aprimoramento da faixa granulométrica do PCA



Fonte: Adaptado de Chhorn, Hong e Lee (2017)

Após a definição da composição da curva granulométrica, dá-se prosseguimento ao ensaio de compactação, com a finalidade de aferir a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo da mistura. Esses parâmetros são

essenciais para proporcionar a melhor compactação possível à mistura. É importante nessa etapa de dosagem, o grau de compactação e a energia de compactação.

Além disso, é comum, ser adotado uma resistência de projeto a ser atendida pelo CCR em seu estado endurecido à idade de 28 dias, seja tomando como referência a resistência à compressão ou a resistência à tração. Um valor bastante comum de resistência à tração, em pesquisas, é de $f_{ctm} = 2,5$ MPa, adotado em relação à tração na flexão por Ricci (2007) e em relação à tração indireta por Sachet (2012).

2.2.2.2 A importância do grau de compactação para o CCR

Segundo o DNIT (2004) e o PCA (HARRINGTON *et al.*, 2010), o Grau de Compactação (GC), em relação à densidade máxima teórica do CCR deverá ser maior ou igual a 98%. O GC do CCR é importantíssimo, pois quando se executa uma compactação insatisfatória, o material tende a apresentar maior porosidade e, decorrente disso, manifestar patologias.

Pitta (1994) afirmou que é comum serem adotados GC mínimos entre 95% e 97% da massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação na energia modificada. Todavia, devido à qualidade dos equipamentos para execução das camadas, alguns fabricantes têm adotado o GC = 98% para energia de compactação modificada nos projetos.

Graça *et al.* (2005) investigaram a influência do GC nas propriedades do CCR. Para tanto, pistas experimentais foram construídas no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., para GC iguais a 94%, 96% e 98%. Os materiais utilizados foram: consumo de cimento CP III 32 igual a 70 kg/m³, tendo o cimento um teor de 50% de escória, aditivo polifuncional e agregados graúdos com $D_{máx}=50$ mm e 25 mm e areia artificial com 12% de material pulverulento, sendo todos agregados provindos da cominuição de rocha granítica. Extraídos os corpos de prova das pistas experimentais, foram realizados ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTD), resistência à tração simples pelo dispositivo Leroy, determinação do coeficiente de permeabilidade à água, perda de água sob pressão em sondagem rotativa, cisalhamento e absorção por imersão e fervura. Os autores concluíram que o GC=94% resultava em CCR muito poroso e permeável, suscetível a diversas deformações devido à baixa resistência. O GC=96% podia ser compreendido como um limite inferior estatístico (em relação ao

GC=98%), tendo em vista que as propriedades do CCR para esse GC ficavam dentro de limites aceitáveis. Chhorn e Lee (2018) reafirmaram a importância de se garantir, minimamente, o GC=98% para que se alcance a máxima resistência do CCR.

Em pista, pode ser utilizado o ensaio de frasco de areia para determinação do GC, segundo a norma DNER ME 092/94. Pitta (1994) sugeriu também o uso de densímetro nuclear para tal aferição e Graça *et al.* (2005) afirmaram que deve ser dada preferência à verificação do GC através do densímetro nuclear. Contudo, caso haja indisponibilidade de equipamento, pode-se então utilizar, com ressalvas, o método do frasco de areia ou da membrana plástica.

2.2.2.3 Energia de compactação das misturas

Trichês (1993) afirmou que as energias usuais da compactação de solo correspondem às energias utilizadas na compactação do CCR. Sendo, portanto, a energia de Proctor Normal ($N=5,8 \text{ kgf.cm/cm}^3$); Intermediária ($I=12,3 \text{ kgf.cm/cm}^3$) e a Modificada ($M=26,5 \text{ kgf.cm/cm}^3$). A Tabela 1 apresenta o número de golpes necessários para compactação de corpos de prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e para os corpos de prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 50 mm, além de suas respectivas energias e camadas necessárias para moldagem.

Havendo a necessidade de utilizar corpos de prova cilíndricos com tamanho reduzido (100 mm x 200 mm), deve-se empregar a Equação 2, assim como realizaram os autores Ricci (2007) e Borré (2017), para se calcular a energia potencial da compactação nas camadas dos corpos de prova cilíndricos com dimensões reduzidas. Portanto, admitindo que o peso do soquete grande é igual a 4,536 kg, com altura de queda igual a 45,7 cm, energia potencial igual a $12,3 \text{ kgf.cm/cm}^3$, correspondente à energia intermediária de Proctor, número de camadas para compactação igual a 3, volume útil do corpo de prova igual a $1570,8 \text{ cm}^3$, encontra-se o número de golpes igual a 32.

A adoção da energia de compactação intermediária para bases de pavimentos é preconizada pela NBR 15115 (ABNT, 2004a), quando se trata da utilização de agregados reciclados da construção civil em camadas de pavimentos. Assim, se o RCD for empregado em camadas de base ou sub-base de pavimentos, a energia de compactação mínima adotada deve ser a intermediária.

Tabela 1 - Números de golpes e camadas para corpos de prova de CCR

Geometria dos corpos de prova	Número de camadas	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Cilíndrico (150 mm x 300 mm)	3	30	65	138
Prismático (150 mm x 150 mm x 500 mm)	2	160	345	733

Fonte: adaptado de Trichês (1993).

$$E_p = \frac{P \cdot h \cdot n_g \cdot n_c}{V} \quad (2)$$

Onde:

E_p é a energia potencial do soquete, em kgf.cm.cm³;

P é a massa do soquete, em kg;

h é altura de queda do soquete, em cm;

n_g é o número de golpes do soquete por camada;

n_c é o número de camadas;

V é o volume do corpo de prova, em cm³.

Fedrico, Rosa e Núñez (2014) estudaram misturas de CCR com consumos de cimento CP V ARI iguais a 80 e 200 kg/m³, destinadas a bases ou sub-bases de pavimentos. Os agregados graúdos e a areia artificial utilizadas nas misturas eram provenientes da cominuição de rocha basáltica e areia natural de leito de rio. Para ambos consumos de cimento foram adotadas duas energias de compactação: a normal e a modificada, com utilização de corpos de prova com dimensão reduzida (100 x 200 mm). Após a dosagem das misturas, foram realizados ensaios mecânicos de RCS e RTD apenas aos 7 dias, estando os resultados sintetizados na Tabela 2.

Desse modo, Fedrico, Rosa e Núñez (2014) constataram que a umidade ótima da mistura tende a diminuir com o acréscimo do teor de cimento. Referente ao aumento da energia de compactação, foi observado que ele tende a ser mais eficaz nas misturas com consumo de cimento igual a 80 kg/m³, pois foi evidenciado um ganho de 4 vezes mais nos valores de RCS e de 3 vezes mais para RTD. Corroborando que para baixos consumos de cimento, o aumento da energia de

compactação é mais significativo que para misturas com maiores consumos de cimento. Outrossim, observou-se que o ganho de resistência das misturas de CCR é mais evidente quando se aumenta o consumo de cimento do que quando se aumenta a energia de compactação.

Tabela 2 - Resultados de CCR para base e sub-base de pavimentos

Consumo de cimento (kg/m ³)		80		200	
Energia de compactação		N	M	N	M
Umidade ótima (%)		11,00	7,40	8,10	7,25
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)		19,97	21,50	20,70	21,40
RCS (MPa)	Média	1,240	4,610	8,360	12,37
	Desvio padrão	0,190	0,520	1,022	2,007
RTD (MPa)	Média	0,210	0,620	1,220	1,400
	Desvio padrão	0,033	0,062	0,109	0,193

Fonte: adaptado de Fedrigo, Rosa e Núñez (2014)

2.2.3 Propriedades do CCR no estado fresco e no estado endurecido

Basicamente, o CCR apresenta duas propriedades no estado fresco: a trabalhabilidade e a massa específica. Segundo Toffolo (2015), a primeira delas se refere à consistência do concreto e à facilidade de realizar o espalhamento e a compactação, a segunda delas constitui um valor de referência para alcançar o nível de compactação do material *in situ*, sendo superior à do concreto convencional, entre 1% e 3% (ANDRIOLO, 1989; VASCONCELOS, 2002). Para o estado endurecido do CCR, Mehta e Monteiro (2014) elencaram a resistência, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, a fluência, propriedades térmicas e durabilidade.

Andriolo (1989, p. 105) afirmou que “a resistência à compressão axial simples do concreto compactado é afetada principalmente pela relação água/aglomerante e pela energia de compactação”. Entretanto, essa resistência varia de acordo com a tecnologia adotada para sua concepção, ou seja, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), se é adotada a abordagem da tecnologia do concreto, o volume da pasta excede o volume de vazios entre os agregados e a resistência à compressão torna-se dependente do fator água/cimento como prevê a lei de Abrams. A contraponto, se é adotada a abordagem da tecnologia de solos, na qual a pasta de cimento não é

capaz de preencher os vazios entre os agregados, a lei de Abrams deixa de ter valia sobre o CCR e sua resistência, frequentemente, passa a ser em função do teor de umidade da mistura.

Não obstante, “O CCR tem quase a mesma relação entre a resistência à compressão e resistência à tração que o concreto normal, variando de 7 a 13%” (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.619). Andriolo (1989) e Vasconcelos (2002) apontaram que a resistência à tração do CCR correspondia, entre 5% e 20%, dos respectivos valores de resistência à compressão, como exemplo dessa relação, Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) observaram que as misturas de CCR com consumo de cimento iguais a 80 e 200 kg/m³ apresentaram valores RTD próximos a 15% dos valores de RCS, estando dentro do intervalo citado por Andriolo (1989) e Vasconcelos (2002).

Chhorn, Hong e Lee (2018) conduziram um estudo sobre a relação entre as resistências à compressão e à tração do CCR. Partindo da premissa de que na literatura há várias equações que estimam, para o concreto convencional, valores de resistência à tração em função da resistência à compressão. Analogamente, os autores ajustaram equações de regressão para o CCR com esse objetivo. Foi conclusivo que há similaridade na relação entre as resistências de tração e compressão do CCR, bem como ocorre para o concreto convencional. Todavia valores de RTD do CCR, estimados a partir das equações utilizadas na pesquisa, tendem a ser menores que valores estimados para o concreto convencional. Outrossim, para a estimativa da Resistência à Tração na Flexão (RTF), o tempo de cura do concreto deve ser considerado na regressão, enquanto para a tração por compressão diametral, isso pode ser desconsiderado.

Segundo Chhorn, Hong e Lee (2018), a Equação 3 busca estimar o valor de RTF em função da RCS e do tempo de cura do CCR, enquanto a Equação 4 estima o valor de RTD somente em função da RCS do CCR. Os coeficientes de regressão dos modelos são 0,72 e 0,62, respectivamente com a média dos erros quadráticos respectivos de 0,058 e 0,062.

$$f_r = 1,143 \cdot f_c^{0,369} \cdot d^{0,11} \quad (3)$$

$$f_{sp} = 0,47 \cdot f_c^{0,511} \quad (4)$$

Onde:

f_r é a resistência à tração na flexão, em MPa.

f_c É a resistência à compressão, em MPa.

d é o tempo de cura, em dias.

f_{sp} é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa.

Comumente, o coeficiente Poisson tende a resultar em valores entre 0,15 e 0,22 (ANDRIOLO, 1989) ou entre 0,15 e 0,20 (BALBO, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em relação ao módulo de elasticidade, Andriolo (1989) inferiu que os principais determinantes para as propriedades elásticas do concreto são a idade, o tipo de agregado, o fator a/c e/ou a qualidade da pasta. Mehta e Monteiro (2014) ainda acrescentaram a essa lista, o grau de hidratação do cimento, expondo que uma tensão térmica devido ao calor de hidratação é proporcional ao módulo de elasticidade do concreto. Ainda assim,

o módulo de deformação do “concreto rolado” é menor que o módulo de deformação do concreto convencional nas baixas idades quando se usa um baixo teor de pasta (cimento e água). A partir da idade de, aproximadamente, 90 dias, o módulo de deformação do “concreto rolado” tende a se assemelhar ao do concreto de massa convencional (ANDRIOLO, 1989, p.119).

A fluência do CCR é devida tanto a características intrínsecas da mistura, como ao efeito de condições externas, impondo-se assim, como uma propriedade complexa e de difícil compreensão (ANDRADE, 1997). Andriolo (1989) delimitou que essa propriedade é fortemente subjetiva ao módulo de deformação do agregado e ao teor de finos na argamassa. Mais especificamente, Mehta e Monteiro (2014) afirmaram que a fluência do CCR é devida ao tipo de agregado, fator a/c, tempo e duração do carregamento. Além disso, uma mistura de CCR com baixa resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade normalmente apresentará elevada fluência, bem como os concretos leves com grande quantidade de finos.

Quanto à fadiga do CCR, Trichês (1993) afirmou que esse tipo de concreto pode apresentar um comportamento similar ao concreto convencional para pavimentos. Além disso, para uma mesma faixa de consumo de cimento, pode se esperar que o CCR alcance maiores valores de resistência na fadiga devido ao baixo consumo de água na mistura.

Os modelos de comportamento na fadiga de CCR com consumos de cimento iguais a 120 e 200 kg/m³, com critério de formação de uma fissura de 2,5 mm, propostos por Trichês (1993), foram adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) e são sugeridos como modelos para serem aplicados no dimensionamento de camadas de pavimento em CCR. Portanto, a Equação 5 apresenta o modelo experimental de fadiga, proposto por Trichês (1993) para CCR com consumo de cimento igual a 120 kg/m³ e sugerido pela PMSP (2004a), enquanto a Equação 6 trata-se do modelo de ruptura por fadiga para CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³. Segundo Trichês (1993), ambas equações apresentaram um coeficiente de determinação (R²) igual a 0,95, sendo que a Equação 5 possui um desvio-padrão (sd) igual a 0,148 e a Equação 6, sd = 0,340.

$$N_f = 10^{(14,911-15,074.RT)} \quad (5)$$

$$N_f = 10^{(14,310-13,518.RT)} \quad (6)$$

Onde:

N_f é o número de repetições de cargas;

RT é a razão entre a máxima tensão de tração na flexão que ocorre na fibra mais tracionada do corpo de prova e a resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias.

Andriolo (1989), Vasconcelos (2002) e Mehta e Monteiro (2014) concordaram que as características térmicas (difusividade, condutividade, calor específico e coeficiente linear de expansão térmica) do CCR são similares às características do concreto convencional de massa equivalente.

Quanto aos requisitos que o CCR deve apresentar para emprego em camadas de pavimentos brasileiros, a Tabela 3 sumariza esses requisitos segundo as normativas nacionais.

Até o momento, o DNIT não apresenta, uma norma específica para especificação de serviço da camada da base em CCR, por isso, alguns pesquisadores verificam se as misturas dosadas atendem ao mínimo valor de RCS requerido pela norma 056/2013 (DNIT, 2013). Como exemplos, pode-se citar Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) e Borré (2017).

Tabela 3 - Requisitos para CCR no Brasil

Referência	DNIT (2013)	DNIT (2004)	PMSP (2004a)
Camada	Sub-base	Revestimento	Base
RCS	$\geq 5,0$ MPa	$f_{ck,est} \geq f_{ck}^3$	≥ 15 MPa ⁴
RTF	-	-	$\geq 1,5$ MPa
Idade do ensaio	7 dias	28 dias	28 dias
Espessura da camada	-	-	10 – 20 cm
Consumo de cimento (kg/m ³)	80 – 120	≥ 200	-

Fonte: adaptado de DNIT (2004, 2013) e PMSP (2004a).

2.2.4 Vantagens e desvantagens do uso de CCR para pavimentação

Andriolo (1989, p.38) afirmou que “comparativamente, ao concreto convencional, o uso de CCR resulta em custo unitário inferior”. Tal diferença de custo, a depender da complexidade da estrutura, pode variar entre 25 e 50 por cento a menos que o concreto convencional (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Andrade (1997) e Silva (2006), uma característica importante do CCR é a possibilidade de incorporar materiais alternativos à mistura. Balbo (2009) também elucidou que desde a década de 1980, as vantagens do CCR podem ser consideradas sob vários aspectos como: consumo de cimento, habilidade de compactação e ganho de massa específica, com a ressalva de que se empregue uma mistura bem graduada de agregados. Harrington *et al.* (2010) também reiteraram o benefício econômico e rapidez construtiva do CCR.

Toffolo (2015) citou como benefícios do CCR, a elevada rigidez que previne o surgimento de deformações nos revestimentos, produção possível de ser executada em centrais de dosagens do concreto, alta resistência à tração na flexão quando sob carregamentos pesados, maior durabilidade e resistência ao desgaste por abrasão.

Apesar das proficuidades supracitadas, o CCR pode apresentar aspectos negativos como quaisquer outros materiais. Dentre eles, Toffolo (2015) elucidou que os equipamentos para execução do CCR possuem limite máximo de espessura igual

³ Significa que o CCR precisa apresentar a resistência estimada maior ou igual à resistência de projeto.

⁴ Propriedade verificada somente quando não se pode realização o ensaio de RTF.

a 20 cm. Devido a isso, para se alcançar uma espessura mais elevada da camada de CCR, deve-se repetir a execução de camada sobre camada para se obter a espessura projetada. Outro entrave é a necessidade de executar juntas de retração, as quais não podem ser feitas com barras de transferência devido ao processo executivo.

2.3 ALGUMAS PESQUISAS SOBRE CCR

Há uma enorme gama de pesquisas acerca de CCR. Muitas delas buscam introduzir nas misturas, materiais alternativos capazes de suprir a demanda de materiais naturais ou simplesmente substituir parte da matriz cimentícia, com o intuito de reduzir danos ambientais. Aqui serão abordadas algumas pesquisas sobre CCR com agregados naturais ou com substituição de frações de agregados.

2.3.1 Pesquisas sobre CCR com agregados naturais

Com o objetivo de realizar uma análise da viabilidade de obtenção de concreto de alta resistência compactado com rolo, Abreu (2002) pesquisou dosagens de CCR para obter esse tipo de concreto com $RCS \geq 40$ MPa e $RTF \geq 4,5$ MPa. O programa experimental da pesquisa fundamentou-se na definição da resistência de projeto do CCR; escolha do tipo de cimento com desempenho conhecido; definição de uma curva granulométrica apropriada dos agregados utilizados nos traços; definição da variação do consumo de cimento; definição da energia de compactação dos corpos de prova; determinação da umidade ótima de compactação do CCR; moldagem de um traço piloto e moldagem dos demais traços. Ao fim, foi concluído que havia viabilidade técnica para obtenção do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação, haja vista que a resistência média à compressão aos 28 dias foi de 45 MPa e a resistência à tração na flexão foi igual a 5,5 MPa para um consumo de cimento igual a 250 kg/m^3 , o que é relativamente baixo quando se trata de concreto para revestimento em pavimentação.

Abreu (2002) também comparou a utilização de três tipos diferentes de cimento para produzir CCR: CP II E 32, CP III 32 RS e CP V ARI PLUS RS. Dentre os três tipos, o que atingiu melhores resultados de RCS foi o CP V ARI PLUS RS, haja vista que os outros dois tipos apresentaram valores RCS cerca de 10 MPa a menos do que aqueles produzidos com esse cimento. Entretanto quando comparados os valores de

RTF obtidos após 28 dias, o cimento que atingiu melhores resultados foi o CP III 32 RS.

Fedrigio, Rosa e Núñez (2014) estudaram misturas de CCR com agregados naturais e dois consumos de cimento CP V ARI: 80 kg/m³ e 200 kg/m³, moldados sob duas energias de compactação distintas: normal e modificada. A partir dos resultados obtidos na pesquisa (Tabela 2), os autores também concluíram que:

O aumento na resistência causado pelo acréscimo do teor de cimento é maior que o causado pela mudança de energia de compactação, podendo ser explicado pela grande diferença entre os dois teores utilizados, sendo o maior deles 2,5 vezes mais elevado que o menor. Lembrando que para o menor teor de cimento, o efeito da compactação é mais acentuado (FEDRIGO; ROSA; NÚÑEZ, 2014, p. 7).

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos por Della Vecchia (2013) acerca de CCR com agregados naturais, adição de fibras de polipropileno de 6 mm e 24 mm, consumo de cimento CP V ARI igual a 200 kg/m³, moldados na energia modificada. O autor utilizou a mesma dosagem das misturas de CCR que Fedrigio, Rosa e Núñez (2014). Isso porque os resultados expostos no artigo desses autores são decorrentes do trabalho de conclusão de curso de Fedrigio, em 2012. Todavia, Della Vecchia (2013) adicionou fibras de polipropileno às suas misturas de CCR. Dessa forma, o autor empregou dois tipos de fibras: 6 mm e 24 mm adicionadas às taxas de 0,25% e 0,5%. Assim como Fedrigio, Rosa e Núñez (2014) realizam os ensaios mecânicos apenas aos 7 dias, Della Vecchia (2013) também realizou seus experimentos apenas para essa idade de cura do CCR.

Tabela 4 - Resultados mecânicos para CCR com 200 kg/m³ de cimento com fibras

Energia de compactação	% Fibra 6 mm	% Fibra 24 mm	RCS (MPa)	RTD (MPa)
Normal	0,00	0,00	6,54	1,22
	0,25	0,00	8,47	1,27
	0,50	0,00	9,52	1,19
	0,00	0,25	8,83	1,27
	0,00	0,50	9,72	1,15
Modificada	0,00	0,00	9,62	1,40
	0,25	0,00	11,61	1,67
	0,50	0,00	11,21	1,45
	0,00	0,25	11,75	1,75
	0,00	0,50	12,34	1,65

Fonte: adaptado de Della Vecchia (2013).

2.3.2 Pesquisas sobre CCR com substituição dos agregados miúdos

Diferentes tipos de insumos alternativos já foram pesquisados como possíveis agregados alternativos para CCR. Dentre os insumos analisados para substituição dos agregados miúdos naturais, pode-se citar: borracha triturada (MOHAMMED; ADAMU, 2018), areia industrial (PINTO, 2010; SACHET, 2012), Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) (PINTO, 2010), cinza pesada de biomassa e cinza volante de biomassa (LESSARD *et al.*, 2017), Polietileno Tereftalano (PET) (NOROOZI *et al.*, 2019), cinza pesada proveniente do processamento de carvão mineral (SILVA, 2006) e Cinza da Casca de Arroz (CCA) (Carpio, 2009).

Silva (2006) estudou a viabilidade da utilização de cinza pesada em adição ao CCR destinado à camada de base de pavimentos semirrígidos e concluiu que esse material alternativo adicionado como agregado miúdo influenciava positiva e diretamente no desempenho mecânico do CCR. Nas misturas com consumo de cimento igual a 80, 120 e 160 kg/m³ e com substituição total da areia natural por cinza pesada, observou-se acréscimos respectivos de 34%, 15% e 45% da resistência à tração na flexão, em comparação ao traço referência.

Carpio (2009) utilizou Cinza da Casca de Arroz (CCA) *in natura*, em substituição ao agregado natural miúdo (considerando a massa dos materiais) às taxas de 5%, 10% e 20% e CCA moída às taxas de substituição em massa de 3%, 5%, 7% e 10%. Foi observado que a porcentagem ótima de substituição da cinza estava entre 5% e 7%, pois com tal porcentagem, atingia-se RCS = 14,5 MPa. Embora a CCA *in natura* tenha alcançado menores valores de RCS, em relação à cinza moída, ela ainda deveria ser considerada como um potencial material para substituição do agregado natural miúdo, tendo em vista que, com a substituição em 5%, foi evidenciado um aumento de 25% nos valores de RCS aos 28 dias, em relação à mistura referência. As médias de RCS e RTF apresentaram um aumento significativo para misturas de CCR com consumo de cimento igual a 80 kg/m³ e 5% de CCA moída, seguidos por uma redução significativa das médias dessas propriedades mecânicas à medida em que se aumentava o consumo de cimento até 160 kg/m³.

A partir da investigação de parâmetros de CCR com incorporação de Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) para utilização em base de pavimentos, Pinto (2010) observou que a massa específica do concreto sofre diminuição quando se emprega esse tipo de escória em substituição, em massa, ao agregado miúdo. As misturas de

CCR com areia natural e EGAF necessitaram de maior umidade para compactação que as misturas contendo areia industrial. As médias de RTD e RTF sofreram um decréscimo condizente com aquele verificado para massa específica, embora não sendo tão proeminente o declínio quando se utilizou o resíduo em conjunto com a areia industrial (cerca de 16%). Além disso, também foi evidenciado que:

A utilização de 50% de areia industrial e 50% de escória granulada de alto forno resultam nas menores razões de módulo de elasticidade e resistência à tração, sendo o CCR com melhor desempenho teórico em relação aos demais pelo fato de apresentar baixo valor de módulo de elasticidade e resistência à tração compatível (menores níveis de tensões na camada cimentada de base);
A compactação do CCR abaixo da umidade de compactação resulta em maiores relações entre módulo de elasticidade e resistência à tração para todas as misturas; sendo assim, um concreto com pior desempenho do que aqueles moldados na umidade ótima de compactação (PINTO, 2010, p.157).

Misturas de CCR com consumo de cimento igual a $268,6 \text{ kg/m}^3$ e borracha triturada em substituição à areia natural às taxas de 20% e 30% apresentaram reduções respectivas de 16,3% e 23,2% nos valores de RCS aos 28 dias, em comparação ao CCR moldado apenas com agregados naturais. Comparando ainda a mistura com 10% de borracha triturada, observou-se um aumento de 18,7% de RCS na mesma idade, em comparação à mistura referência, evidenciando que essa baixa porcentagem de substituição (10%) seria a melhor opção dentre as estudadas. Quanto à RTF, todas as misturas com borracha triturada apresentaram um aumento dessa propriedade em relação ao CCR referência (MOHAMMED; ADAMU, 2018).

Em relação ao PET, Noroozi *et al.* (2019) realizaram substituições do agregado miúdo natural em volume por esse resíduo às taxas de 0%, 12,5%, 25%, 37,5% e 50% em misturas de CCR com consumo de cimento entre 210 kg/m^3 e 260 kg/m^3 , com substituição do cimento por metacaulim e adições de fibra reciclada de pneus. Os autores concluíram que o aumento da porcentagem de partículas de PET tende a reduzir valores de RTD, RTF, RCS e peso específico das misturas devido à pobre aderência entre as partículas e o material cimentício. Dentre as misturas estudadas, foi indicada para uso em pavimentação, aquela com 25% de substituição areia por PET em volume, 20% de cimento por metacaulim, em massa, e adição de 1,9% de fibras de aço reciclada, em massa.

A Tabela 5 sintetiza resultados de propriedades mecânicas para misturas de CCR com agregados alternativos. Nesses casos, foram utilizados a cinza pesada

(SILVA, 2006), a CCA (CARPIO, 2009) e a EGAF (Pinto, 2010). As dimensões dos Corpos de Prova (CP) prismáticos, utilizados para ensaio de RTF foram: 150 x 150 x 500 mm (SILVA, 2006; CARPIO, 2009) e 100 x 100 x 400 mm (PINTO, 2010). Os CP cilíndricos para o ensaio de RCS com dimensões de 150 x 300 mm foram utilizados por Silva (2006) e Carpio (2009), já os CP de tamanho reduzido (100 x 200 mm) foram utilizados por Pinto (2010). A energia de compactação adotada foi a normal (PINTO, 2010) e a intermediária (SILVA, 2006; CARPIO, 2009).

Tabela 5 - Alguns resultados de misturas de CCR com substituições de agregados miúdos

Autor/ Consumo de cimento/ Energia de compactação	Mistura	Idade (dias)	RCS (MPa)	RTD (MPa)	RTF (MPa)	E (GPa)
Silva/ 160 kg/m ³ Intermediária	0% cinza pesada	7	10,62	-	-	-
		28	11,65	-	2,12	19,01
	100% cinza pesada	7	5,80	-	-	-
		28	15,20	-	-	19,24
Carpio/ 160 kg/m ³ Intermediária	0% CCA	28	12,13	-	2,53	16,76
	5% CCA moída	28	17,05	-	2,96	19,76
Pinto/ 100 kg/m ³ Normal	Agregado natural	7	-	1,20	3,10	-
		35	-	2,00	3,90	31,50
	Areia industrial	7	-	1,50	3,20	-
		35	-	2,50	4,20	32,10
	EGAF	7	-	0,70	2,10	-
		35	-	1,50	2,30	21,90

Fonte: adaptado de Silva (2006); Carpio (2009); Pinto (2009).

2.3.3 Pesquisas sobre CCR com substituição dos agregados graúdos

Algumas pesquisas sobre CCR com substituições de agregados graúdos por reciclados já foram conduzidas, dentre elas, pode-se elencar a utilização de RCD

(RICCI, 2007), Escória de Forno Elétrico a Arco (FEA), provinda da produção de aço (LAM; JARITNGAM; LE, 2017), Polietileno Reticulado (XLPE), o qual é oriundo do material utilizado para isolamento de fios elétricos e cabos (SHAMSAEI; AGHAYAN; KAZEMI, 2017), *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), do inglês, fresado asfáltico (SACHET, 2012; BORRÉ, 2017; BOUSSETTA; KHAY; NEJI, 2018) e ARC (COURARD; MICHEL; DELHEZ, 2010; LOPEZ-UCEDA *et al.*, 2016).

Cho e Yeo (2004) pesquisaram a aplicação de agregado reciclado de resíduo da construção em concreto magro para sub-base de pavimento. Eles concluíram que o concreto produzido com agregado reciclado apresentava significantes limitações na resistência, em especial na resistência à flexão. Percebeu-se que o concreto com agregado reciclado atingia apenas 60% da resistência de um concreto produzido com agregados naturais. Contudo, os autores ressaltaram que os agregados reciclados da construção produzidos na Coreia contêm grandes quantidades de impurezas e isso poderia ser fator culminante para defasagem nas propriedades mecânicas do concreto endurecido.

Estudando as características mecânicas do CCR com RCD para pavimentação, Ricci (2007) concluiu que tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração do CCR (com 100% de RCD como agregado graúdo, 50% de pedrisco reciclado e acréscimo de 9% de cimento CP III E 40 RS) ficaram próximas às resistências de um CCR produzido com agregados naturais. Por outro lado, houve uma grande discrepância entre os valores de módulo de elasticidade. Afinal, o CCR com agregados naturais apresentou 31 GPa, enquanto o CCR com RCD alcançou somente 17 GPa no ensaio de módulo de elasticidade por pulso de onda ultrassônica.

Sachet (2012) verificou a influência da substituição de agregados naturais por agregados provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos para CCR. Foi concluído a partir da sua pesquisa que o fresado de pavimentos asfálticos é um possível material a ser empregado no CCR para bases e sub-bases de pavimentos.

Lopez-Uceda *et al.* (2016) avaliaram mecanicamente o CCR com adição de ARC às taxas de 0%, 50% e 100% em volume, em substituição aos agregados graúdos naturais e com consumos de cimento iguais a 110, 175, 250 e 350 kg/m³. Eles realizaram ensaios de compactação, RCS, RTD, RTF, módulo de elasticidade, densidade e porosidade, e de retração por secagem. Os autores concluíram que as misturas com consumo de cimento igual a 110 kg/m³ não apresentaram propriedades adequadas para aplicações em construções civis. Todavia, a mistura de CCR com

consumo de cimento igual a 175 kg/m^3 e substituição de 100% dos agregados naturais por ARC poderia ser utilizada para bases de pavimentos com baixo volume de tráfego de veículos pesados, caso de pavimentos urbanos. Em contrapartida, o CCR com consumo de cimento igual a 250 kg/m^3 e 100% de ARC poderia ser facilmente empregado como insumo para bases de pavimentos com volume de tráfego de veículos pesados mais elevado, exemplo de rodovias.

Borré (2017) analisou misturas de CCR com consumo de cimento iguais a 100 kg/m^3 e 150 kg/m^3 e substituição parcial, em massa, dos agregados graúdos naturais por RAP às taxas de 10% e 30%. Os resultados dos ensaios mecânicos (RCS, RTD e RTF) indicaram que as misturas com 10% de RAP são superiores aos resultados da mistura de referência. Além disso, foi observada uma redução nos valores desses ensaios quando se aumentava a taxa de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado.

A Tabela 6 reúne alguns resultados referentes ao desempenho mecânico de misturas de CCR com substituições, em massa, de parte dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados. Os CP utilizados para os ensaios de RCS e RTD foram de dimensões $150 \times 300 \text{ mm}$ somente para a mistura com consumo de cimento igual a 110 kg/m^3 de Ricci (2007). Para as demais misturas utilizaram CP de tamanho reduzido. O mesmo pode ser verificado para o ensaio de RTF. Quanto ao ensaio de Módulo de Elasticidade (E), cabe ressaltar que Ricci (2007) realizou o ensaio através do teste de pulso de onda ultrassônica e que os resultados citados na Tabela 6 para pesquisa de Sachet (2012) foram obtidos através do diagrama tensão x deformação do CCR. Em relação à energia de compactação adotada para moldagem dos CP das pesquisas citadas da Tabela 6, evidenciou-se o uso da energia normal por Ricci (2007) e Sachet (2012) e da intermediária por Borré (2017).

A Tabela 7 apresenta alguns resultados mecânicos referentes à utilização de ARC como agregado graúdo em misturas de CCR. Em ambas misturas apresentadas na Tabela 7, foram empregadas a energia modificada de Proctor. Além disso, o CP prismático utilizados por Lopez-Uceda *et al.* (2016) era de dimensões iguais a $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$, e o CP cilíndrico de $150 \times 300 \text{ mm}$. Courard, Michel e Delhez (2010) utilizam um CP cilíndrico de $160 \times 320 \text{ mm}$ e realizaram a substituição de 100% da fração do agregado natural por ARC, em massa.

Tabela 6 - Alguns resultados de misturas de CCR com substituições de agregados graúdos

Autor/ Consumo de cimento/ Energia de compactação	Mistura	Idade (dias)	RCS (MPa)	RTD (MPa)	RTF (MPa)	E (GPa)
Ricci/ 110 kg/m ³ Normal	0% RCD	7	8,60	-	1,30	-
		28	12,20	-	2,50	31,00
Ricci/ 125 kg/m ³ Normal	100% brita e	7	8,30	-	1,80	-
	50% brita 0 de RCD	28	11,90	-	2,70	26,39
	100% brita e	7	10,00	-	1,80	-
	100% brita 0 de RCD	28	13,00	-	2,50	17,00
Sachet/ 100 kg/m ³ Normal	Areia industrial	7	-	1,15	2,31	-
	+ 0% RAP	35	-	2,45	4,23	30,40
	Areia natural +	7	-	1,19	2,18	-
	0% RAP	35	-	2,06	3,91	19,03
Borré/ 100 kg/m ³ Intermediária	Areia industrial	35	-	1,21	2,55	7,04
	+ 50% RAP	35	-	1,21	2,55	7,04
	0 % RAP	7	6,80	0,60	0,55	-
		28	8,20	0,82	1,12	-
	10% RAP	7	7,85	0,71	0,71	-
		28	9,21	1,05	1,12	-
	30% RAP	7	5,74	0,56	0,63	-
		28	6,17	0,77	0,87	-
Borré/ 150 kg/m ³ Intermediária	0% RAP	7	11,32	1,73	1,60	-
		28	16,27	2,27	1,96	-
	10% RAP	7	11,42	1,33	1,44	-
		28	12,78	1,94	1,90	-
	30% RAP	7	10,30	1,26	1,59	-
		28	11,69	1,67	1,92	-

Fonte: adaptado de Ricci (2007); Sachet (2012); Borré (2017).

Tabela 7 - Alguns resultados de misturas de CCR com ARC

Autor/ Consumo de cimento/ Energia de compactação	Mistura	Idade (dias)	RCS (MPa)	RTD (MPa)	RTF (MPa)	E (GPa)
Courard, Michel e Delhez/ 250 kg/m ³ Modificada	0% ARC	7	41,00	-	-	-
		28	46,00	-	-	-
	100% ARC	7	23,00	-	-	-
		28	28,00	-	-	-
Lopez-Uceda <i>et al.</i> / 110 kg/m ³ Modificada	0% ARC	7	5,50	-	-	-
		28	6,70	1,25	1,24	11,10
	100% ARC	7	3,50	-	-	-
		28	4,50	1,09	0,81	7,00
Lopez-Uceda <i>et al.</i> / 175 kg/m ³ Modificada	0% ARC	7	17,30	-	-	-
		28	20,20	2,41	3,13	18,70
	100% ARC	7	14,80	-	-	-
		28	18,20	2,06	2,09	14,20
Lopez-Uceda <i>et al.</i> / 250 kg/m ³ Modificada	0% ARC	7	28,20	-	-	-
		28	33,20	3,61	4,93	22,70
	100% ARC	7	17,90	-	-	-
		28	21,50	2,67	3,93	16,10
Lopez-Uceda <i>et al.</i> / 350 kg/m ³ Modificada	0% ARC	7	35,60	-	-	-
		28	40,60	4,54	6,22	24,3
	100% ARC	7	23,90	-	-	-
		28	23,90	3,31	4,90	18,90

Fonte: adaptado de Courard, Michel e Delhez, (2010); Lopez-Uceda *et al.*, (2016).

Ao pesquisar o uso de XLPE como agregado para pavimento de CCR, substituindo os agregados naturais em volume, Shamsaei, Aghayan e Kazemi (2017) perceberam que esse resíduo diminuiu em 42% o tempo de vibração para compactação do CCR com 50% do agregado reciclado. Para o CCR com 5% de XLPE,

foi evidenciado, aos 7, 14 e 28 dias, um acréscimo respectivo de 18%, 9% e 11% da RTD, o que não pode ser evidenciado nas outras misturas com 15%, 30% e 50% de XLPE, nas quais houve uma redução regular em relação ao aumento da porcentagem do resíduo. De modo geral, verificou-se um decréscimo da RCS dos CCR à medida em que se aumentavam as porcentagens do agregado reciclado, com exceção da mistura com 5% de XLPE. Sendo assim, os autores concluíram que seria aceitável substituir o volume de agregado gráúdo natural pelo resíduo à taxa de 5% para produção de CCR, sem grandes perdas nas propriedades mecânicas do concreto. Já para as outras porcentagens de substituições, seus empregos estariam condicionados às condições de tráfego requeridas, podendo ser executadas em pavimentos de baixo volume de tráfego, calçadas, vias rurais etc. Isso foi justificado pelo fato de que embora a adição de XLPE possa reduzir determinadas propriedades do concreto, ele beneficia outras características como ductibilidade e energia de absorção do material.

2.4 O RESÍDUO DE CONCRETO

Balbo (2007) elucidou que a grande demanda da infraestrutura urbana vem abrindo espaço para o emprego de materiais alternativos, incluindo a incorporação em diferentes escalas, de agregados os quais, inúmeras vezes, são descartados incorretamente. Dentre os resíduos comumente descartados, os mais notórios são os entulhos provindos de obras da construção civil (de edifícios ou residências, por exemplo) ou fresados provenientes da reciclagem de materiais em pistas rodoviárias. Além desses dois principais tipos, estão disponíveis em grande quantidade, borracha triturada de pneus inservíveis e escórias granuladas, resultantes de processos siderúrgicos.

Bernucci *et al.* (2008) também admitiram o emprego de materiais alternativos a serem incorporados em camadas de pavimento, como agregados reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição (RCD), escórias de alto-forno, rejeitos de extração de rochas ornamentais e misturas asfálticas fresadas.

A ABNT (2004a) através da NBR 15115 e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), classificaram os resíduos da construção civil como classe A e os delimitaram como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições de obras da construção civil.

Balbo (2007) afirmou que o uso de agregados provenientes de RCD é bastante viável para pavimentação, como material granular nas camadas de reforço, sub-base e base. Bernucci *et al.* (2008) também concluíram que os RCD podem ser empregados nessas camadas de pavimento, desde que atendam às exigências da NBR 15115. Não obstante, Arulrajah *et al.* (2014) também classificaram os RCD estudados como agregados bem graduados, passíveis de serem empregados nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

Leite *et al.* (2011) avaliaram em laboratório, o RCD para pavimento e perceberam que a absorção de água varia drasticamente dependendo da natureza dos materiais, sendo que o teor de absorção de água do RCD cresce significativamente quando há presença de materiais cerâmicos. Por outro lado, em relação ao módulo de resiliência do concreto, percebeu-se que o agregado de RCD apresentava comportamento similar a uma brita graduada padrão. Em relação à porosidade dos RCD, Balbo (2007, p. 208) delimitou que:

A porosidade do RCD poderá causar acréscimos substanciais na quantidade de água (umidade ótima de compactação) para mistura e aplicação do material. Tal fato poderá resultar em variações nas resistências de CCR elaborados com tais materiais, exigindo eventualmente aumentos no consumo de cimento.

De acordo com Buttler (2003), a camada de argamassa aderida à superfície dos agregados reciclados tem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas do material, sendo que essa camada foi responsável pela alta porosidade do agregado, alta absorção e redução da massa específica. Além disso, o autor também ressaltou que a perda de trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado em relação ao concreto com agregado natural foi devida à absorção de água do agregado reciclado que prosseguiu após a mistura.

Em razão de o resíduo de concreto ter a argamassa envelhecida como principal constituinte do agregado, a massa específica do concreto com ARC tende a ser menor que a massa específica do concreto com agregados naturais. Isso se deve ao fato de que o ARC possui maior porosidade e absorção de água. Ademais esse tipo de resíduo também apresenta maior desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles e superfície mais rugosa quando comparado ao agregado natural (RAO; BHATTACHARYYA; BARAI, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

A partir da pesquisa de Cho e Yeo (2004) compreendeu-se que o agregado reciclado de concreto não pode ser utilizado para produção de placas de concreto para pavimentos. Entretanto, os autores identificaram a possibilidade de produzir bases de CCR para pavimentos com ARC, desde que se observasse os tipos de agregados finos usados para compor a mistura.

Debieb *et al.* (2009) estudaram o emprego de agregado contaminado⁵ de construção e demolição para produção de CCR. Foi confirmado que os agregados reciclados apresentavam significativas diferenças em relação aos naturais, devido às impurezas da antiga argamassa que ficava ligada aos agregados após a trituração do concreto original. Isso resultou em baixa densidade e grande absorção de água dos ARC produzidos. Notou-se que os agregados provenientes da trituração do concreto poluído eram mais ricos em cloretos que em sulfatos, indicando assim que uma lavagem ou submersão do agregado em água durante duas semanas seria suficiente para o reaproveitamento do material no concreto sem qualquer risco de corrosão posterior. Por fim, os autores também denotaram que o CCR contendo ARC contaminado apresentou compacidade similar ao CCR com agregado natural e, obviamente esse segundo tipo de CCR alcançou melhor valor de resistência à compressão, devido à qualidade dos agregados naturais.

Arulrajah *et al.* (2012) verificaram as características geotécnicas do ARC e sua aplicação em sub-base de pavimentos. Após os ensaios de Abrasão Los Angeles, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e ensaio triaxial de cargas repetidas, foi concluído que o ARC atingia os critérios mínimos para uso em sub-base de pavimento. No entanto, alguns materiais (com teor de umidade igual a 71% e 80% da umidade ótima) mostraram-se suscetíveis à umidade, apresentando limites mais altos de deformação e menor módulo resiliente.

A partir do ensaio triaxial de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência dos materiais, Gabr, Mills e Cameron (2013) verificaram que os dois tipos de ARC pesquisados, provenientes de RCD poderiam ser aplicados como agregados para execução de base de pavimentos quando comparados com o agregado natural, sendo que se utilizasse 98% da energia modificada de compactação para umidade ótima entre 60% e 90%.

⁵ No caso dessa pesquisa, o ARC era considerado contaminado ou poluído, devido à cura do concreto original: alguns foram curados em soluções de cloretos e outros em soluções de sulfato.

Sadati e Khayat (2016) desenvolveram um estudo para avaliar o desempenho de um pavimento de concreto construído com a incorporação de ARC. Foram aferidas as propriedades frescas e endurecidas de oito misturas de concreto com adição de ARC. Percebeu-se que nenhuma mistura de concreto apresentou defasagem na resistência à compressão, em relação ao concreto referência em diferentes idades. Entretanto, verificou-se uma redução de 6% dos concretos com ARC quanto à resistência à tração e de 7% na resistência à flexão. Corroborando os resultados dessa pesquisa, Kumar (2017, p. 254) afirmou que “as propriedades físicas do agregado grosso reciclado são inferiores às propriedades do agregado gráudo natural”. A partir dessas observações, pode-se constatar que tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à flexão do concreto produzido com agregado reciclado são inferiores às resistências do concreto de referência com agregados naturais (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014; KUMAR, 2017).

Em relação aos efeitos da energia de compactação nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados, Leite (2007) apontou que a granulometria do agregado tende a ser alterada devido à compactação. Com o emprego das energias intermediária e modificada, o resíduo sofre quebras excessivas das partículas. Foi evidenciado também que a porcentagem de partículas com formato cúbico aumentou de 55,7% para 68% mediante a redução das partículas lamelares de 38,8% para 29%, sob efeito da compactação na energia intermediária.

Cabe ressaltar que quando se executam camadas de pavimentos com agregados reciclados, a NBR 15115 (ABNT, 2004a, p. 8) lembra que “não é recomendável que a camada de reforço de subleito, sub-base ou base de agregado reciclado seja submetida à ação direta do tráfego”.

2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Para Balbo (2007) o dimensionamento de uma estrutura de pavimento condiz com a determinação das espessuras das camadas e os tipos de materiais de insumo a serem utilizados para sua construção, de maneira que sejam atendidas as condições de projeto referentes ao tráfego e clima. Franco (2007) salientou que para um adequado dimensionamento, deve ser evitado o alcance prematuro a valores admissíveis de quaisquer dos índices estimadores de dano acumulado ou de condições de serventia do pavimento.

Mattos (2014) elucidou que os mais conhecidos e antigos métodos de dimensionamento são puramente empíricos, sendo o mais difundido, embasado no valor de *California Bearing Ratio* (CBR). Além disso, de modo geral, esses métodos requerem poucos dados de entrada, como exemplo, o valor de suporte do subleito (CBR) e o número N, referente ao volume de tráfego para o horizonte de projeto.

Todavia, o ensaio de CBR em si próprio é realizado em três etapas: compactação, expansão e resistência à penetração. Assim, quando se utiliza o valor de CBR de um solo, também é levado em consideração a expansão do material na camada do pavimento. A primeira etapa do ensaio é realizada para se determinar a curva de compactação do material, obtida com a compactação de, no mínimo, cinco CP na energia normal de Proctor; a expansão é obtida a partir da submersão, em quatro dias, dos CP compactados e as leituras são realizadas através de extensômetros; a terceira etapa condiz com a retida do CP da submersão e rompido através da penetração de uma agulha. Por fim, calcula-se o valor de CBR pela razão entre pressão lida pela pressão padrão.

Resumidamente, há três tipos de métodos de dimensionamento de pavimentos: empíricos, semiempíricos e empírico-mecanicistas. Métodos empíricos resultaram de modelos estatísticos da evolução de parâmetros físicos provenientes de pavimentos em serviço; métodos semiempíricos foram embasados em uma teoria analítica consistente e desenvolvidos a partir de extrapolações teóricas e racionais, como por exemplo, a utilização de valores de CBR, como critério de parametrização das estruturas; já os métodos empírico-mecanicistas são decorrentes da calibração de modelos teóricos com dados experimentais ou laboratoriais, e visam avaliar coerente e analiticamente o comportamento estrutural das camadas do pavimento (BALBO, 2007).

No Brasil, segundo Medina e Motta (2015, p. 335), percebe-se que:

As estruturas de pavimentos asfálticos de rodovias têm sido dimensionadas pelo método do DNER⁶, com base no ensaio CBR, curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA (USACE) e dados obtidos da pista experimental do AASHO⁷, do fim da década de 1950, adaptados pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza.

Nesse contexto, Mattos (2014, p. 23) ressaltou que:

⁶ Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, substituído pelo DNIT em 2001.

⁷ American Association of State Highway and Transportation Officials.

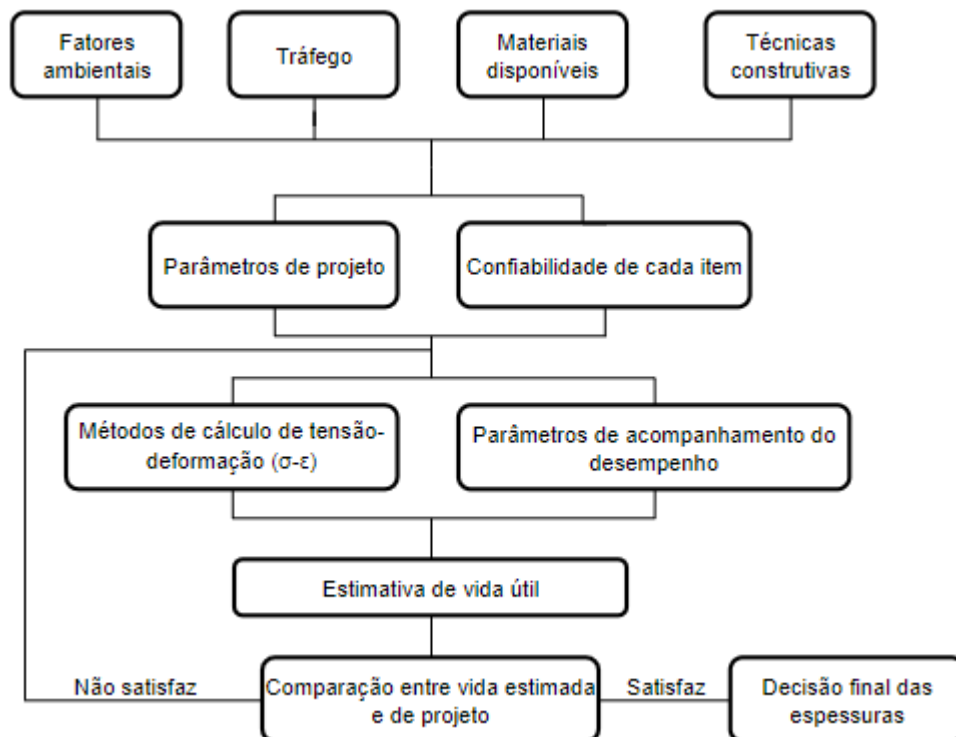
Daquela época até os dias de hoje, os conhecimentos acumulados sobre pavimentação avançaram consideravelmente, podendo-se aplicar no dimensionamento de pavimentos princípios mecanísticos, superando a fase de métodos puramente empíricos.

Segundo Franco (2007), indiferente do método, o conceito de ruptura do pavimento é fator crucial no projeto. Assim, a definição de ruptura (seja estrutural ou funcional) deve ficar evidente ao se propor um dimensionamento de estrutura de pavimento. Sobretudo, deve-se garantir que o pavimento não venha a sofrer ruptura estrutural dentro do horizonte de projeto.

O dimensionamento de um novo pavimento, sob uma abordagem empírico-mecanicista, deve seguir o esquema recomendado por Medina e Motta (2015), proposto por Motta (1991) (Figura 3). Assim:

No dimensionamento mecanístico, [...] parte-se de espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões e deformações, que se comparam a valores limites estabelecidos. Por realimentações sucessivas chega-se a uma estrutura satisfatória. Este procedimento é bastante comum no cálculo estrutural da engenharia civil. Contrasta com a abordagem determinística do método do CBR (MEDINA; MOTTA, 2015, p. 348).

Figura 3 - Esquema de dimensionamento empírico-mecanicista



Fonte: Motta (1991).

Franco (2007) elucidou que, sob a perspectiva de um dimensionamento empírico-mecanicista, sequencialmente, deve-se: coletar dados referentes aos materiais, tráfego e clima; correlacionar os parâmetros de resistência dos materiais e dados de tráfego em função da sazonalidade climática; correlacionar as respostas dos materiais em função do carregamento; selecionar espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações, não menosprezando as correlações já realizadas; relacionar, através de modelos de previsão, valores críticos de tensões e deformações com os danos provenientes da repetição de cargas; e por fim, conferir se as espessuras satisfazem as condições do dimensionamento.

O fluxograma da Figura 4 foi desenvolvido por Franco (2007) em sua tese. Ele é referente à elaboração do Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos (SisPav) e traz esquematicamente a rotina necessária para o dimensionamento de estruturas de pavimentos para esse método. É importante ressaltar que o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, está em fase de implantação no Brasil. Método o qual é decorrente dos estudos de Franco (2007) e fruto de Termo de Execução Descentralizada entre Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e diversas universidades brasileiras.

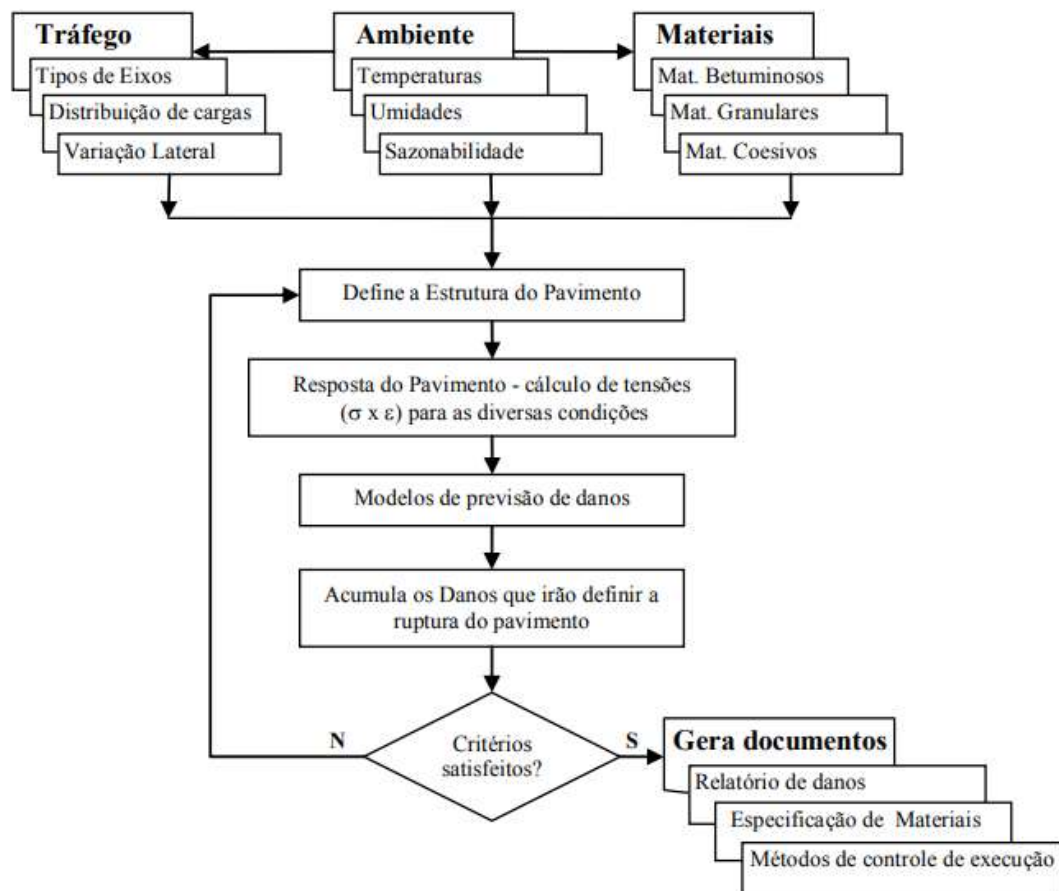
O MeDiNa utiliza a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) para calcular as tensões e deformações ocorridas na estrutura de pavimentos. Por isso, as hipóteses adotadas para a solução computacional, de acordo com Franco e Motta (2018), são:

- a) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos, sendo que a modelagem elástica não linear é realizada através de iterações elásticas lineares;
- b) O módulo de compressão é similar ao módulo de tração, portanto, valida-se a lei de Hooke;
- c) As camadas são ilimitadas horizontalmente;
- d) O sub-leito apresenta espessura semi-infinita, ao contrário das outras camadas;
- e) Ocorrem tensões normais na área sob ação de cargas;
- f) As tensões e deformações são nulas em grandes profundidades;

- g) As condições de aderência entre camadas podem variar de totalmente aderidas a sem aderência.

Além disso, referente às misturas asfálticas, o método leva em consideração o envelhecimento dessas misturas, no decorrer do tempo, devido à exposição ao sol e intempéries.

Figura 4 - Fluxograma do SisPav



Fonte: Franco (2007).

2.5.1 O Método do Dimensionamento Nacional de Pavimentos

O MeDiNa é um *software* bastante intuitivo. A tela inicial é dividida em abas e apresenta uma estrutura padrão que serve de exemplo ao projetista (Figura 5). Quadros (2018) explicitou que antes de iniciar o dimensionamento é importante inserir o Volume Médio Diário de veículos (VMD) referente ao primeiro ano de abertura da via; o Fator de Veículo (FV); o Número equivalente de eixos anual (N), a porcentagem

de veículos na faixa de projeto e a taxa de crescimento da frota para o horizonte de projeto.

Figura 5 - Tela inicial do MeDiNa

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiss C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	199	0,45

EXDO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
PV:	1.000
N anual (1º ano):	5.00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5.00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5.00e+06

O MeDiNa é inicializado com uma estrutura de pavimento de quatro camadas a qual deve ser alterada em consonância aos materiais constituintes das camadas e ao número de camadas necessários para cada dimensionamento. O método em si, traz algumas sugestões de materiais, mas se recomenda a realização dos ensaios para obtenção das propriedades de cada material e a inserção deles como novos materiais no sistema. Dessa forma, realiza-se um dimensionamento mais coerente, pois se trabalha com as particularidades do material disponível para execução da camada e não simplesmente com uma aproximação. Como exemplo de materiais sugeridos pelo MeDiNa, encontram-se misturas de CCR para base, dosadas por Trichês (1993).

Além disso, cada tipo de material requer propriedades mínimas a serem determinadas em laboratório antes da realização do dimensionamento. Segundo Franco e Motta (2018), para materiais asfálticos, há três conjuntos: asfaltos

tradicionais, modificado por polímero e modificado com borracha. O Módulo de Resiliência (MR) é considerado elástico linear e deve ser obtido através do ensaio de compressão direta. Quadros (2018) ressaltou que os dados mínimos de entrada para inserir um novo material asfáltico são: coeficiente de Poisson, tipo de contato, Módulo de Resiliência em MPa, e os coeficientes de regressão para a curva de fadiga do material.

Para inserção de novos materiais estabilizados (BGTC, CCR, solo-cimento), deve-se informar o MR em MPa, coeficiente de Poisson, massa específica aparente seca, resistência à tração por flexão aos 28 dias, e coeficientes para o modelo de fadiga. Consoante a Franco e Motta (2018), o MeDiNa considera esses materiais com propriedades elásticas variáveis ao longo da vida de serviço. Logo, o MR decai mensalmente seguindo um comportamento sigmoidal entre dois limites: o superior (quando o material ainda não sofreu danos por fadiga) e o inferior (quando o material atingiu a vida de fadiga e se encontra trincado com comportamento similar a um material granular). O modelo matemático (Equação 7) utilizado pelo MeDiNa para representar a redução do MR, mediante o acúmulo e aumento do dano de fadiga para materiais estabilizados, foi proposto por Ayres em 1997 e adotado por Franco (2007).

$$MR = MR_{\min} + \frac{MR_{\max} - MR_{\min}}{1 + e^{-4+14.Di}} \quad (7)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência da camada cimentada no período, em MPa;

$MR_{\min}$ é o limite inferior do módulo de resiliência, em MPa;

$MR_{\max}$ é o limite superior do módulo de resiliência, em MPa;

Di é o consumo de vida de fadiga acumulado no mês i , em %.

Quanto ao modelo de previsão de danos por fadiga nos materiais estabilizados, o MeDiNa utiliza a Equação 8 para isso. Franco e Motta (2018) ainda ressaltaram que o *software* faz duas checagens para aprovar o emprego da camada cimentada: a primeira, verifica se o dano por fadiga não é superior a 25% do valor em apenas um período e a segunda verifica se a deflexão da camada não é superior a 0,01 mm.

$$N_f = 10^{(k_1 + k_2 \%RF)} \quad (8)$$

Onde:

N_f é número de repetições de carga que levam à ruptura por fadiga;

k_1 e k_2 são os coeficientes da regressão;

$\%RF$ é a relação entre tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Segundo Quadros (2018), para um novo material granular, minimamente, deve-se informar o coeficiente de Poisson, o tipo de contato, o modelo constituinte (linear ou não) os coeficientes de regressão quando se trata de um modelo resiliente não linear ou o MR em MPa quando se trata de um modelo resiliente linear e os coeficientes de regressão da deformação permanente.

Após a definição das camadas e de seus respectivos materiais constituintes, pode-se realizar o dimensionamento de uma das camadas em relação às espessuras das outras, pré-definidas. Na prática, o *software* dimensiona uma camada por vez e cabe ao projetista definir as espessuras das outras. Desse modo, a camada sinalizada com os símbolos “>><<” será a camada dimensionada naquele momento. Na Figura 5, observa-se que a camada que está sendo dimensionada é a de revestimento em concreto asfáltico, por exemplo. Contudo, o MeDiNa realiza a checagem do atendimento ao critério de fadiga, para em seguida, verificar o atendimento ao critério de deformação permanente total.

O resultado do dimensionamento compreende a nível de informações, o nível de confiabilidade da análise, o qual dependerá do tipo de via (Tabela 8), a estimativa da porcentagem da área trincada no fim do período e a deformação permanente total. Na aba de relatórios, pode-se acessar a evolução dos danos mensais estimados para o pavimento e as bacias de deflexões teóricas.

Por outro lado, quanto à aderência entre as camadas do pavimento, o “MeDiNa não permite que o projetista insira valores numéricos para esse parâmetro, e define apenas duas condições: NÃO ADERIDO (=0) e ADERIDO (=1)” (FRANCO; MOTTA, 2018, p. 28). Nessas condições são apenas considerados “Aderido” em três situações: camada asfáltica sobre outra camada asfáltica, camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas e tratamento superficial sobre camada asfáltica.

Tabela 8 - Critérios de parada do dimensionamento e confiabilidade

Tipo de via	Confiabilidade (%)	ATE (%)	ATR (mm)
Sistema Arterial Principal	95	30	10
Sistema Arterial Primário	85	30	13
Sistema Arterial Secundário	75	30	20
Sistema Coletor Primário	85	30	13
Sistema Coletor Secundário	75	30	20
Sistema Local	65	30	20

Fonte: Franco e Motta (2018).

3 METODOLOGIA

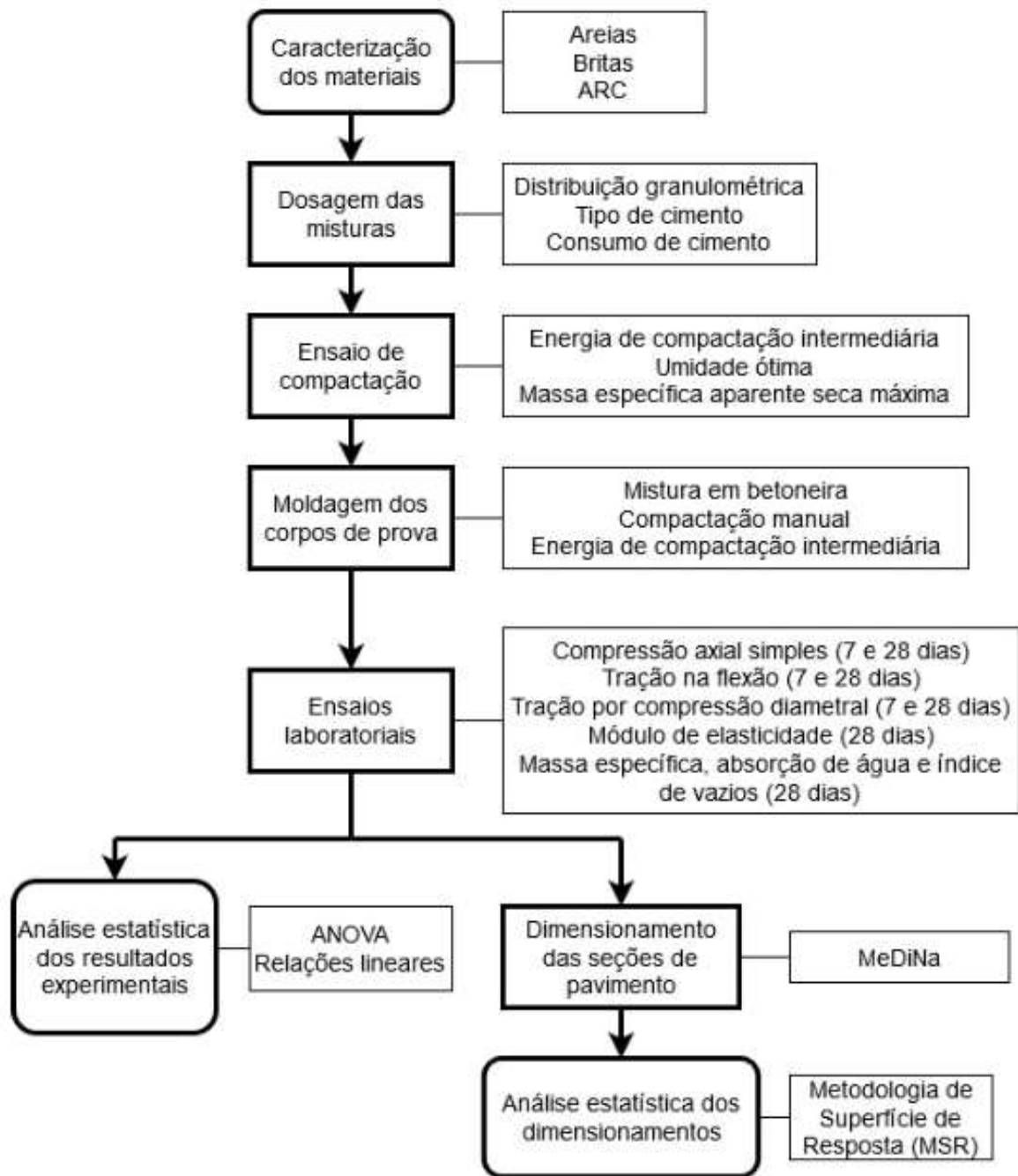
A presente pesquisa sustentou-se a partir de uma abordagem quantitativa acerca de CCR dosado com ARC para execução de base de pavimentos. Para tanto, a pesquisa foi dividida em duas partes: uma pesquisa bibliográfica e uma pesquisa experimental. A pesquisa bibliográfica referiu-se à estruturação do referencial teórico, o qual serviu como base de teoria e de comparação de resultados em estudos pertinentes ao tema, realizados outrora. Já a pesquisa experimental consistiu em estabelecer uma metodologia de experimentos laboratoriais capazes de aferir as propriedades mecânicas das misturas de CCR, com o intuito de verificar se o desempenho desse tipo de concreto, com substituições de frações dos agregados graúdos naturais por ARC, em massa, são aceitáveis perante às normas rodoviárias vigentes para sua aplicação em camada de base de pavimentos.

Por conseguinte, após a etapa de pesquisa bibliográfica (parte dela foi concomitante à experimental para efeitos de referenciação atualizada), executou-se a etapa experimental, a qual foi dividida em seis partes: caracterização dos materiais; dosagem das misturas de CCR; moldagem dos corpos de prova do CCR; aferição das propriedades mecânicas do CCR; análise estatística da influência do resíduo nas propriedades mecânicas do CCR; verificação da aplicabilidade do resíduo em CCR para pavimento através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Mais sucintamente, pode-se observar as etapas pertinentes ao programa experimental da pesquisa, através do fluxograma da Figura 6.

Parte dos ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação e outra parte, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), ambos do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) da UDESC.

As variáveis estudadas no programa experimental têm por objetivo avaliar o desempenho do CCR com substituição do agregado graúdo natural por ARC. Assim, as variáveis respostas definidas foram: RCS, RTD, RTF, E, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Sendo que os fatores controláveis correspondem às taxas de substituições do agregado graúdo natural por ARC, em massa, de 5%, 15% e 30%; cura úmida de 7 e 28 dias para os ensaios de RCS, RTD e RTF; cura úmida de 28 dias para o módulo de elasticidade e absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Figura 6 - Fluxograma do programa experimental



3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS

Nesta etapa do programa experimental, foram realizados ensaios para caracterização dos agregados naturais, empregados nas misturas de CCR e do resíduo pesquisado como agregado para substituição parcial, em massa, da fração gráuda natural de agregados dessas misturas.

A água utilizada para o amassamento do CCR e demais ensaios, como os de absorção de água dos agregados, por exemplo, bem como para a cura dos corpos de prova foi proveniente da rede de abastecimento de água da Companhia Águas de Joinville, portanto foi admitido estar em consonância à norma DNER-EM 034 (DNER, 1997b).

3.1.1 Caracterização do ARC

O ARC analisado foi cedido por uma empresa de Joinville, especializada na reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC). Esse agregado reciclado é proveniente da cominuição dos mais diversos tipos de concreto da construção civil, sejam sobras de concreto usinado, sejam resíduos de elementos estruturais ou de pavimentação. As amostras do resíduo foram coletadas na pilha de ARC, disposta no pátio da empresa. No ato da coleta de amostras do material, foi observado que a pilha desse resíduo possuía pequeno volume de agregados, porque a empresa estava utilizando os resíduos de concreto para execução de um aterro no próprio pátio (Figura 7).

Figura 7 - Utilização de ARC para execução de aterro



Para a coleta das amostras, foram observadas as recomendações da NBR NM 26 (ABNT, 2009a), ou seja, para um agregado com tamanho nominal dos grãos entre 19 mm e 37,5 mm, deve-se coletar em campo, uma amostra mínima, em massa de 75 kg, com número mínimo de amostras parciais igual a 3. Além disso, como é difícil assegurar a obtenção de amostras representativas em pilhas, devido à segregação

do material mais grosso, buscou-se recolher o material do topo, da altura média e no entorno da base da pilha, com intuito de melhor alcançar uma representatividade amostral do ARC.

Para a caracterização do resíduo, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais: composição granulométrica, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003); índice de forma, de acordo com a NBR 7809 (ABNT, 2019); determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual, consoante à NBR 15116 (ABNT, 2004b); determinação da absorção de água e da massa específica, segundo a norma rodoviária DNER-ME 195/97 (DNER, 1997a); e ensaio de abrasão “Los Angeles”, conforme a norma ME 035 (DNER, 1998a).

Como a NBR 7809 (ABNT, 2019) pressupõe, as frações passantes na peneira com abertura de malha de 9,5 mm foram desprezadas, bem como as porcentagens menores que 5%, retidas individualmente, em massa, em outras peneiras. Portanto, a quantidade de grãos retidos nas peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm foram utilizadas no ensaio, sendo medidos o comprimento e a espessura dos grãos, com um paquímetro.

Quanto à determinação da composição dos agregados reciclados graúdos, como prevê a NBR 15116 (ABNT, 2004b), foi submetida ao ensaio, uma amostra de 4 kg do resíduo para separação visual dos grãos nos seguintes grupos: no grupo 1 eram alocados os fragmentos com pasta de cimento em mais de 50% do volume; ao grupo 2 pertenciam os fragmentos de rochas; para o grupo 3, eram destinados os fragmentos cerâmicos; e ao grupo 4, pertenciam os fragmentos não minerais de natureza orgânica ou contaminantes (exemplos de betumes, madeiras e plásticos). De modo ilustrativo, a Figura 8 apresenta amostras dos quatro grupos requeridos pela referida norma.

Após a separação visual dos fragmentos, foram determinadas as porcentagens representativas de cada grupo, dividindo os valores de massa dos grupos em relação à massa total. Consecutivamente, pôde-se identificar se o agregado se tratava de um ARC, Agregado de Resíduo Misto (ARM) ou material não mineral.

Referente ao ensaio de abrasão “Los Angeles”, conforme a norma ME 035 (DNER, 1998a), foi considerada a graduação B da norma, com número de rotações do tambor igual a 500 e massa total da amostra igual a 5000 ± 10 g, obtida a partir das massas parciais do agregado, retidas nas peneiras de 19 mm e 12,5 mm.

Figura 8 - Amostras dos grupos requeridos pela NBR 15116



3.1.2 Caracterização dos agregados miúdos

Para realização dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos, foram utilizadas duas frações de areia. Uma delas é comercializada como areia média, proveniente de leito de rio, extraída da Bacia do rio Cubatão. A outra é comercializada como areia fina, de cava, proveniente da região de Joinville. Entretanto, devido à curva granulométrica desses agregados, a primeira areia passou a ser denominada areia 2,4 mm e a segunda, areia 1,2 mm.

Para a caracterização desses materiais, foram realizados o ensaio de granulometria, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica segundo a norma DNER-ME 194/98 (DNER, 1998b).

3.1.3 Caracterização dos agregados graúdos naturais

As britas 12,5 mm e 19 mm, de gnaiss, foram cedidas pelo LMCC do DEC da UDESC. Sendo tais agregados provenientes de jazidas localizadas em Joinville. Quanto à caracterização, foram realizados os ensaios de análise granulométrica, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), determinação da absorção de água e da massa específica, como preconiza a norma rodoviária ME 195 (DNER, 1997a) e de abrasão “Los Angeles”, segundo a norma ME 035 (DNER, 1998a).

Referente ao ensaio de abrasão “Los Angeles”, as amostras das britas submetidas ao ensaio corresponderam às graduações B e C, da norma, para a brita 12,5 mm e 19 mm, respectivamente. Para ambas britas, as massas totais submetidas

ao ensaio corresponderam a 5000 ± 10 g e número de rotações do tambor igual a 500 para ambas graduações.

3.1.4 As características dos agregados empregados na pesquisa

A Figura 9 apresenta amostras de todos os agregados utilizados nesta pesquisa para as dosagens das misturas de CCR. Em seguida, a Tabela 9 apresenta as porcentagens passantes dos agregados ensaiados nas peneiras utilizadas, segundo a NBR 248 (ABNT, 2003). A Figura 10 apresenta as curvas granulométricas de todos os agregados, sendo que todos os agregados apresentaram distribuições granulométricas contínuas.

Figura 9 - Amostras dos agregados utilizados na pesquisa

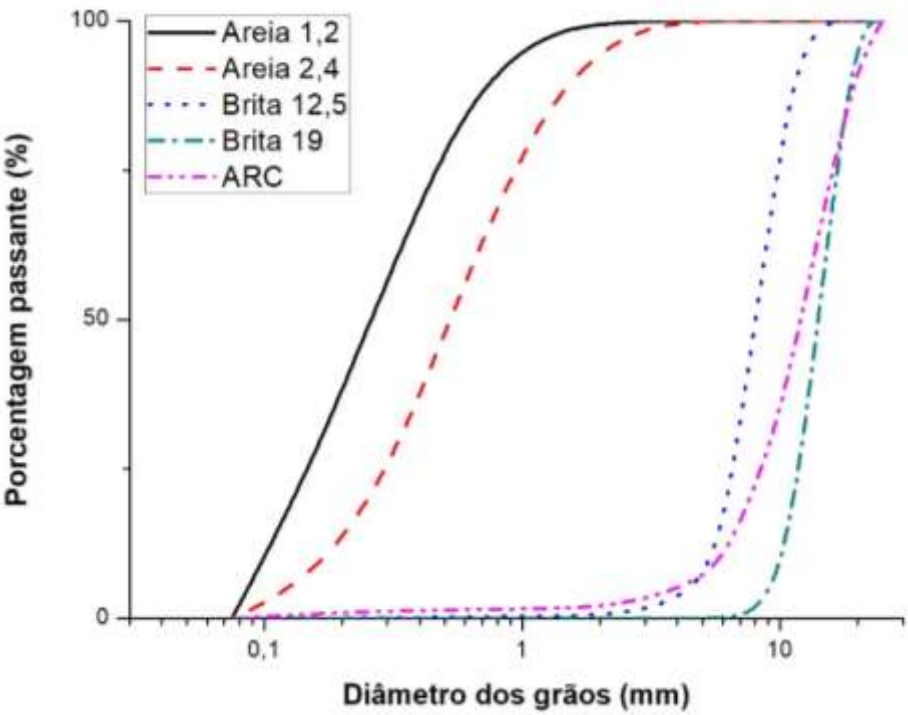


Com relação à distribuição granulométrica, a NBR 7211 (ABNT, 2009b) especifica limites para utilização de agregados miúdos e graúdos para concreto. Considerando esses limites, a Figura 11 apresenta os limites para utilização de agregados miúdos para o concreto. Essa figura evidencia que, devido à curva granulométrica, o uso da areia de cava não seria recomendado como insumo para concreto, enquanto a areia de rio, estaria quase que em totalidade dentro da zona ótima de utilização. Outrossim, pressupondo uma mistura de ambos agregados miúdos, formada por um terço da areia de cava mais dois terços da areia de rio, poderia se atender à norma, pois a mistura de areias estaria dentro dos limites da zona utilizável da referida norma.

Tabela 9 - Porcentagens passantes dos agregados

Peneira (mm)	ARC	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia 2,4 mm	Areia 1,2 mm
38	100	100	100	100	100
25	99,15	100	100	100	100
19	91,17	100	100	100	100
12,5	53,13	29,10	100	100	100
9,5	29,84	1,80	73,6	100	100
6,3	10,89	0,02	16,3	100	100
4,75	5,80	0,02	3,50	99,93	100
2,36	1,97	0,02	0,50	98,27	99,87
1,18	1,61	0,01	0,40	85,42	98,24
0,6	1,48	0,01	0,20	56,71	86,81
0,3	1,21	0,00	0,10	23,04	56,86
0,15	0,76	0,00	0,00	6,23	24,64
0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

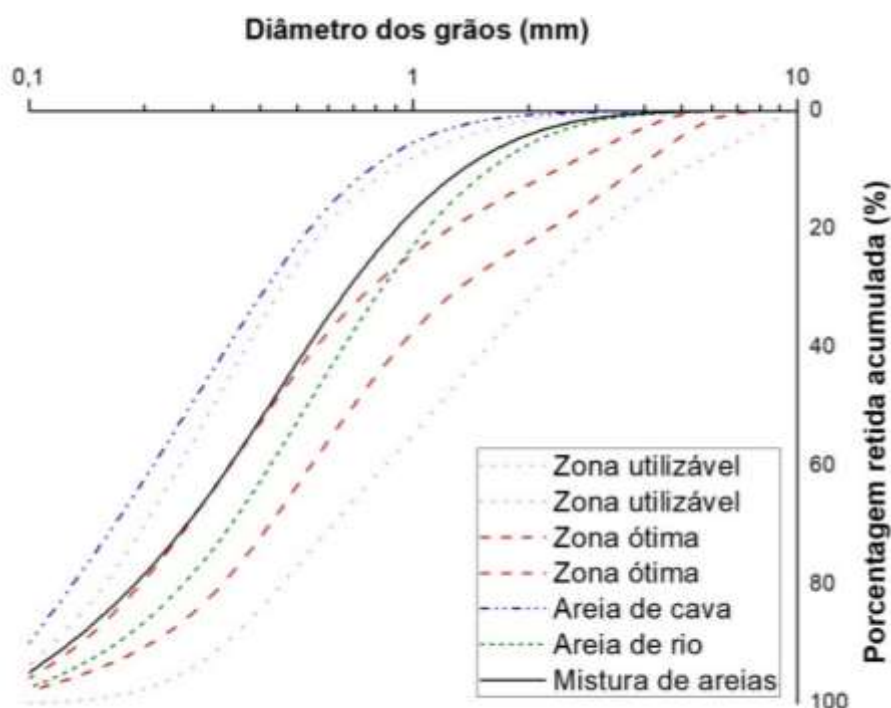
Figura 10 - Curvas granulométricas dos agregados



A Figura 12 apresenta o tipo de brita que se utilizou na dosagem das misturas de CCR, de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009b). Consoante à classificação

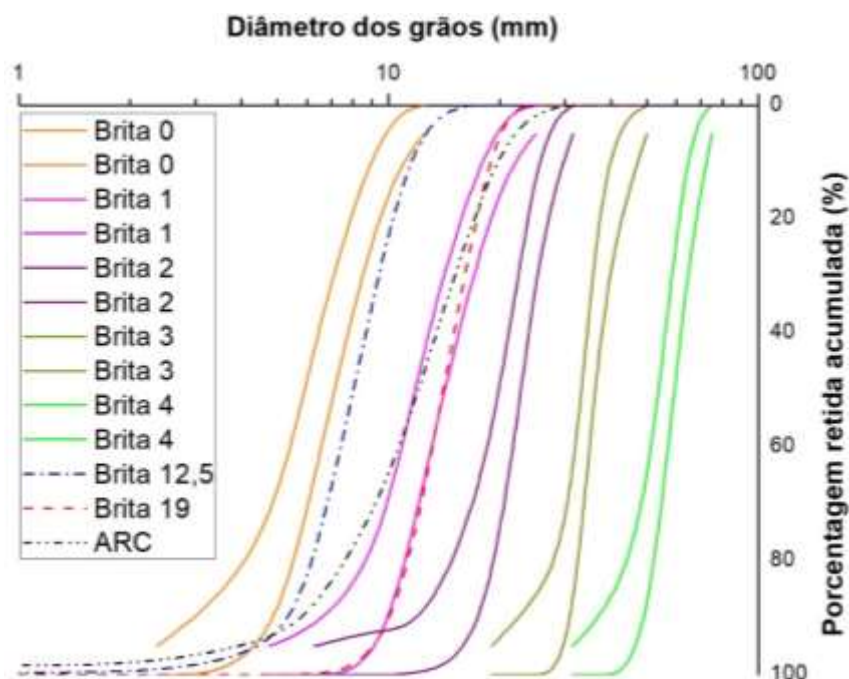
da referida norma, foi utilizada uma fração de brita 0 e outra fração de brita 1, sendo nomeadas essas frações na pesquisa como brita 12,5 mm e 19 mm, respectivamente. A mistura dessas frações, de acordo com a classificação da norma, seria identificada como uma brita 1.

Figura 11 - Limites da NBR 7211 para agregados miúdos



A Tabela 10 apresenta os resultados dos cálculos de Módulo de Finura (MF) e $D_{máx}$ de todos os agregados, além dos resultados referentes aos ensaios de determinação da massa específica, absorção de água e de abrasão “Los Angeles”.

Como pode ser observado na Tabela 10, o $D_{máx}$ do ARC é igual a 25 mm e o $D_{máx}$ dos agregados naturais é igual a 19 mm, portanto para se realizar uma substituição lógica do agregado natural pelo reciclado, foi decidido que para as etapas de dosagem e moldagem das misturas de CCR, seria excluída a fração de agregados com diâmetro acima de 19,1 mm. Esse procedimento de exclusão de uma fração granulométrica também foi adotado por Borré (2017), tendo em vista que na sua pesquisa, o fresado também apresentava algumas partículas com diâmetro acima de 19 mm e para que fosse realizada a substituição dos agregados naturais pelo fresado, em massa, foi excluída a fração de agregados reciclados com diâmetro superior a 19 mm.

Figura 12 - Limites da NBR 7211 para agregados graúdos**Tabela 10** - Resultados dos ensaios dos agregados

Ensaio	ARC	Brita 19	Brita 12,5	Areia 2,4	Areia 1,2
MF	6,66	6,98	6,24	2,30	1,34
D _{máx} (mm)	25	19	12,5	2,4	1,2
Massa específica (g/cm ³)	2,19	2,72	2,93	2,63	2,64
Absorção de água (%)	7,63	0,20	0,27	-	-
Abrasão "Los Angeles" (%)	32,00	12,83	14,15	-	-

Foi estabelecido que se verificaria o índice de forma pelo método do paquímetro apenas para o ARC, porque a utilização dos agregados britados é corriqueira no LMCC. Assim, foi pressuposto que eles atendiam à NBR 7211 (ABNT, 2009b), a qual prevê a utilização de agregados para concreto com forma predominante cúbica, numericamente inferior a 3. Isto posto, a Tabela 11 apresenta o resultado da determinação do índice de forma, segundo a NBR 7809 (ABNT, 2019) para o ARC.

Como o ARC apresentou índice de forma igual a 1,79, infere-se que esse agregado reciclado apresenta forma predominante cúbica. Consoante à norma 7211 (ABNT, 2009b), é recomendada a utilização desse agregado como insumo para concreto, pois o resultado do ensaio é inferior a 3.

Tabela 11 - Determinação do índice de forma do ARC

Diâmetro (mm)			Média Ponderada
19	12,5	9,5	
1,92	1,76	1,75	1,79

Por fim, a Tabela 12 apresenta o resultado da determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004b). A partir dela, pode-se evidenciar que o agregado reciclado realmente se trata de um ARC, pois ao somar as porcentagens dos grupos 1 e 2, o resultado obtido (92,37%) é superior a 90%, como recomenda a referida norma.

Tabela 12 - Determinação da composição do agregado reciclado por análise visual

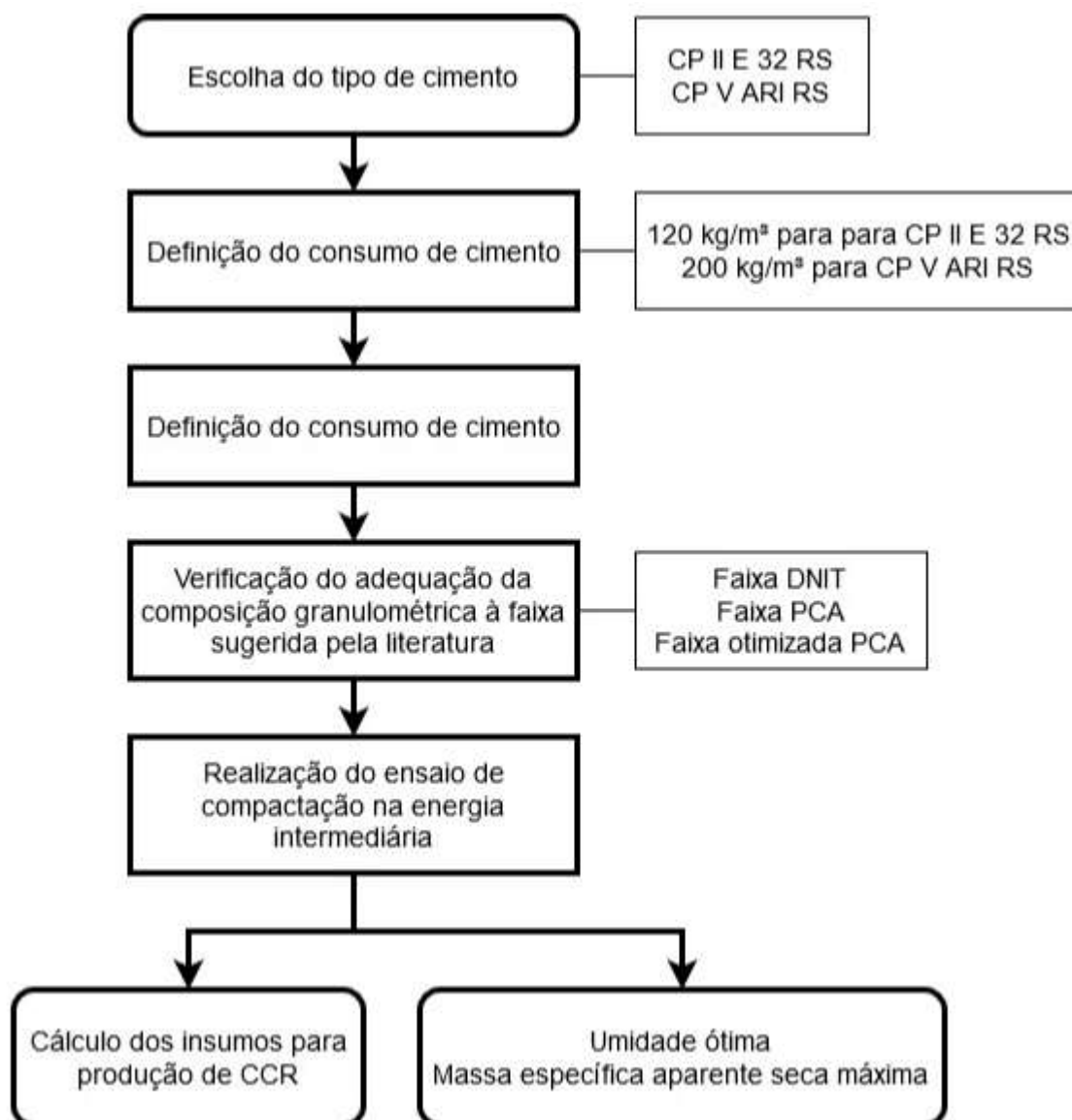
Grupo	Massa (g)	Porcentagem (%)
1	3061,6	76,56
2	632,2	15,81
3	66,7	1,67
4	283,3	5,96

3.2 DOSAGEM DAS MISTURAS DE CCR

Quanto à metodologia escolhida para dosagem das misturas de CCR, foi adotada aquela que diz respeito à tecnologia de compactação de solos. Para esta etapa da pesquisa, foram seguidos os procedimentos delineados na Figura 13.

Como a primeira parte da etapa de dosagem é a definição do tipo de cimento a ser utilizado, optou-se por utilizar, inicialmente, um cimento CP II E 32 RS com massa específica igual a 2,99 g/cm³, segundo o fabricante. Esse tipo de cimento foi escolhido porque o CCR não requer um tipo específico de cimento (ANDRIOLO, 1989; SENÇO, 2008). Para essa opção, também foi considerada a particularidade de o cimento composto, de classe intermediária de resistência (32 MPa) e a recomendação de sua utilização em obras de reciclagem de pavimentos, segundo Kleinert, Núñez e Ceratti (2015). Desse modo, como o tipo de cimento é recomendado para reciclagem de pavimentos, depreende-se que ele apresente um bom desempenho para produção de CCR com agregados reciclados.

Figura 13 - Desenho esquemático da etapa de dosagem das misturas de CCR



Todavia, como as misturas com o cimento composto não atenderam aos requisitos técnicos, foram desenvolvidas misturas com cimento CP V ARI RS, de massa específica igual a 3,00 g/cm³, segundo o fabricante. A escolha desse cimento remete à particularidade de ele apresentar altas resistências iniciais, o que pode ser de grande valia quando se almeja rapidez de execução da obra, haja vista que com cimento de alta resistência inicial, a liberação para execução da camada de revestimento sobre a base de CCR seria em menor tempo.

Após a definição do tipo de cimento, foi definido o consumo de cimento. Para as misturas com CP II E 32 RS foi utilizado consumo de cimento igual a 120 kg/m³, considerando que Trichês (1993) utilizou esse tipo de cimento com mesmo consumo

e aos 7 dias, todas as médias de RCS foram superiores a 5,0 MPa, para quaisquer energias de compactação empregadas na moldagem dos corpos de prova. Segundo a norma DNIT 056 (DNIT, 2013), o consumo de cimento igual a 120 kg/m^3 está dentro do limite (entre 80 kg/m^3 e 120 kg/m^3) para sub-bases.

A intenção de verificar a aplicabilidade de um CCR com consumo de cimento baixo (120 kg/m^3) sustentou-se nos resultados aferidos em outras pesquisas nacionais acerca de CCR, as quais utilizaram consumos de cimento abaixo de 200 kg/m^3 , algum tipo de agregado reciclado e indicaram o emprego das misturas para bases de pavimentos. Seriam as pesquisas de Pinto (2010) e Sachet (2012) que trabalharam com consumo de cimento entre 90 e 130 kg/m^3 e de Ricci (2007) e Borré (2017) que utilizaram consumos de cimento entre 100 e 150 kg/m^3 .

Contudo, como as respostas mecânicas das misturas de CCR com consumo de cimento CP II E 32 RS igual a 120 kg/m^3 não atenderam ao mínimo requerido por norma, decidiu-se mudar todo o traço das misturas. A partir disso, passou a ser utilizado o cimento CP V ARI RS com consumo igual a 200 kg/m^3 , de acordo com o mínimo estabelecido na norma DNIT 059 (DNIT, 2004). Afinal, não há uma norma do DNIT que estabeleça um consumo mínimo de cimento para camada de base em CCR.

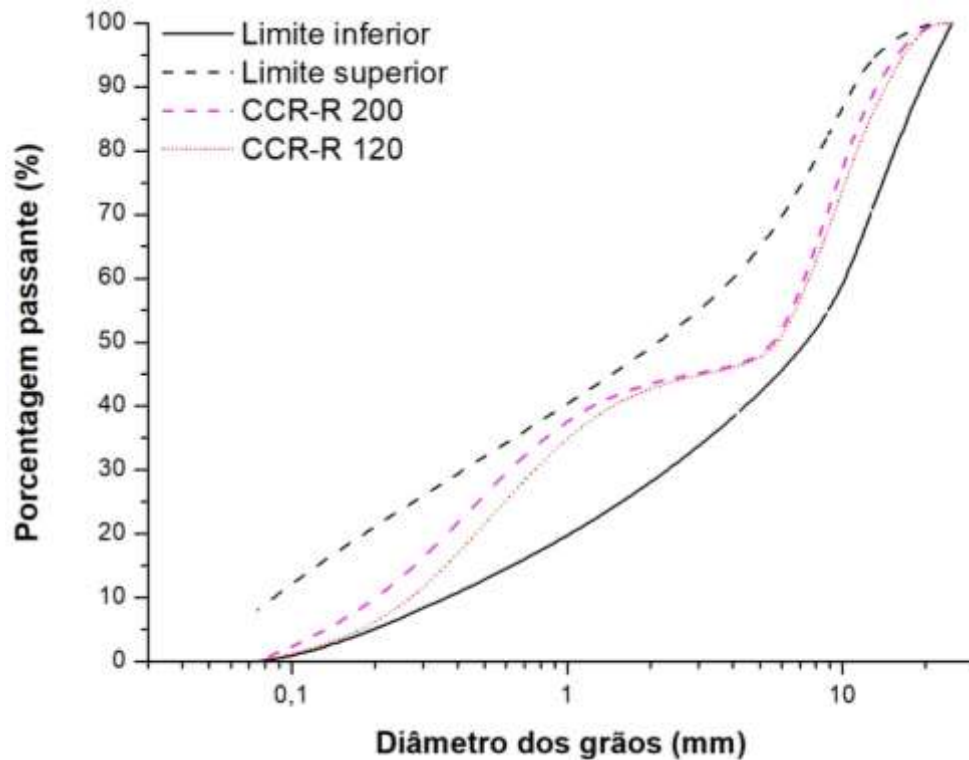
A terceira parte da dosagem diz respeito à definição das porcentagens de agregados para se alcançar uma distribuição total de agregados capaz de atender a uma faixa granulométrica sugerida pela literatura (Figura 1). Como a faixa granulométrica sugerida pelo DNIT é bastante difícil de ser atendida, foi buscado enquadrar a curva granulométrica das misturas de agregados à faixa sugerida pelo PCA e mesmo assim, as curvas granulométricas das misturas de CCR não atenderam a essa faixa. Por fim, passou a ser adotada a faixa otimizada do PCA, sugerida por Chhorn, Hong e Lee (2017) (Figura 2).

Consecutivamente, através da Equação 1, foi calculada a quantidade de agregados requerida para os consumos de cimento adotados. Assim, para a mistura de referência do CCR cujo consumo de cimento foi igual a 120 kg/m^3 (CCR-R 120), a quantidade de agregados requerida para cada 1 kg de cimento foi igual a $16,99 \text{ kg}$ e para a mistura referência de CCR cujo consumo de cimento foi igual a 200 kg/m^3 (CCR-R 200), a quantidade de agregados foi igual a $10,19 \text{ kg}$.

Na Figura 14, pode-se observar as curvas granulométricas das misturas de referência dentro dos limites da faixa granulométrica para CCR, otimizada por Chhorn, Hong e Lee (2017). Por outro lado, a Figura 15 apresenta o atendimento e a

similaridade das curvas granulométricas das misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m^3 , enquanto a Figura 16 apresenta as curvas granulométricas das misturas com consumo de cimento com 200 kg/m^3 .

Figura 14 - Curvas granulométricas das misturas de referências



Para atender à faixa granulométrica, a mistura de agregados do CCR-R 120 foi composta, em massa, por 45% de areia de rio, 35% de brita 12,5 e 20% de brita 19. Em contrapartida, para a mistura CCR-R 200, a curva granulométrica foi composta em massa por 15% de areia de cava, 30% de areia de rio, 40% de brita 12,5 e 15% de brita 19. Além disso, para ambos consumos de cimento, foi optado por realizar a substituição dos agregados britados (britas 12,5 e 19) pelo ARC às taxas de substituições de 5%, 15% e 30%, em massa. Essas taxas de substituições foram assim definidas com bases em substituições de agregados naturais por resíduos, realizados outras pesquisas, como a de Borré (2017), na qual, os agregados naturais graúdos foram substituídos por RAP às taxas de 10% e 30%; ou da substituição de agregados graúdos naturais por XLPE às taxas de 5%, 15%, 30% e 50%, de Shamsaei, Aghayan e Kazemi (2017).

Figura 15 - Curvas granulométricas das misturas com 120 kg/m³ de cimento

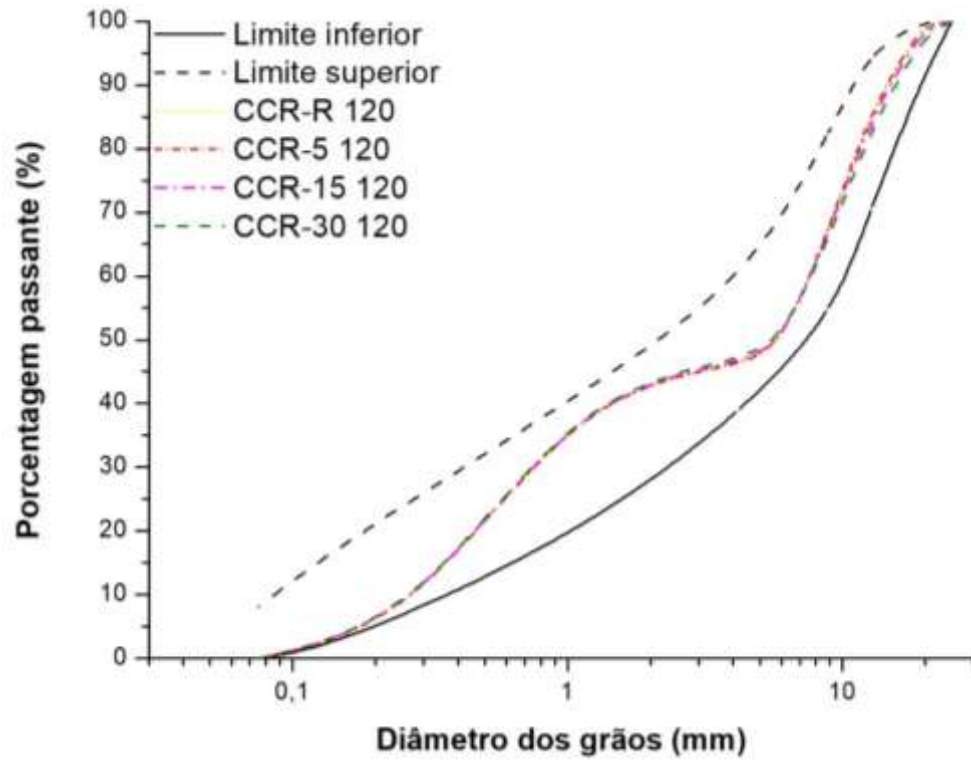
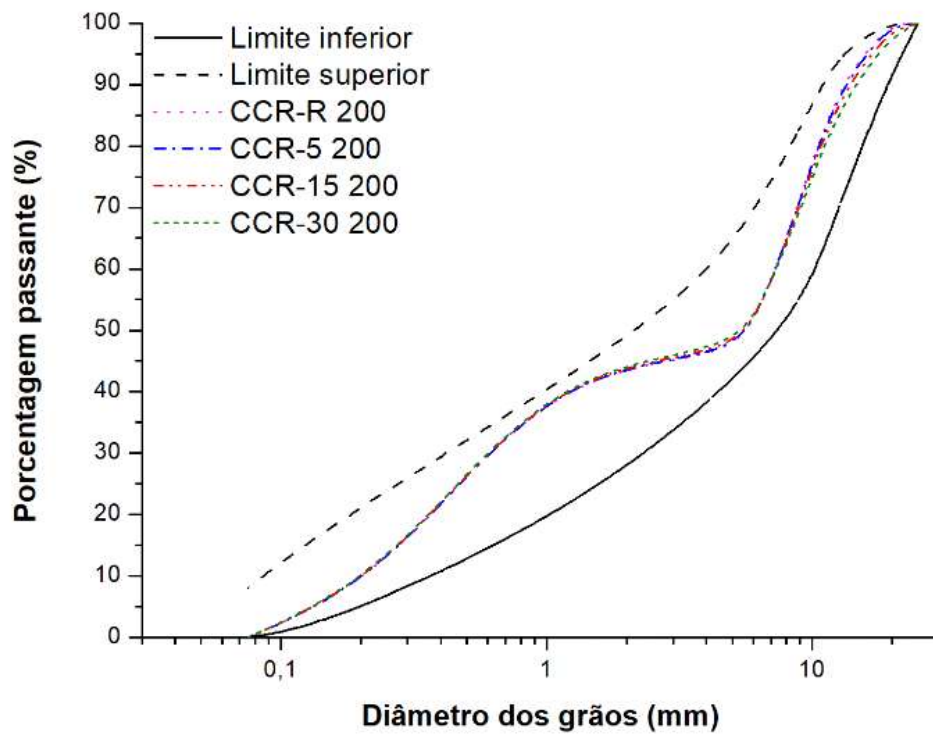


Figura 16 - Curvas granulométricas das misturas com 200 kg/m³ de cimento



Pode ser observado nas Figuras 15 e 16 que não há grande diferenciação entre as distribuições granulométricas das misturas e que em diversos pontos, elas ficam sobrepostas, elucidando assim, a similaridade da composição granulométrica das misturas.

As quantidades de agregados utilizados para produção de CCR foram calculadas a partir da Equação 1, para cada consumo de cimento. Algumas considerações tiveram de ser feitas para se utilizar tal equação. Foi adotado um teor de umidade igual a 6,5%, como recomendou Trichês (1993); o volume de vazios foi considerado igual a 5% para 1 m³ de CCR, valor adotado também por Abreu (2002), Pinto (2010), Toffolo (2015) e Borré (2017). Com bases nessas adoções, foi calculado o valor de *m*, através de uma planilha eletrônica (Quadro 1). E partir desse resultado, foram calculadas as quantidades de insumos requeridas por unidade de cimento para produção de CCR, conforme observado nas Tabelas 13 e 14. Com as quantidades de agregados calculadas para cada unidade de cimento, puderam ser realizados os ensaios de compactação das misturas para se obter os valores de umidade ótima.

Quadro 1 - Planilha eletrônica utilizada para os cálculos da quantidade de insumos para CCR

Massa específica dos materiais (g/cm³)			Porcentagem de agregado na mistura (%)		
areia de cava		2,64	15		
areia de rio		2,63	30		
brita 12,5		2,93	40		
brita 19		2,72	15		
ARC		2,19	0		
cimento		3,00	Total		100
Massa específica da mistura (g/cm³)		2,76	Volume de vazios (litros)		50
Consumo de cimento (kg/m³)		200	Umidade (%)		6,5
Quantidade de agregados por unidade de cimento (kg)				10,19	
Traço unitário em massa (kg)					
cimento	areia de cava	areia de rio	brita 12,5	brita 19	ARC
1,00	1,53	3,06	4,08	1,53	0,00

Tabela 13 - Quantidade de insumos para misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento

Mistura	Traço unitário
	(cimento: areia de rio: brita 12,5: brita 19: ARC)
CCR-R 120	1,00:7,65:5,95:3,40:0,00
CCR-5 120	1,00:7,57:5,47:2,94:0,84
CCR-15 120	1,00:7,41:4,53:2,06:2,47
CCR-30 120	1,00:7,17:3,19:0,80:4,78

Tabela 14 - Quantidade de insumos para misturas de CCR com 200 kg/m³ de cimento

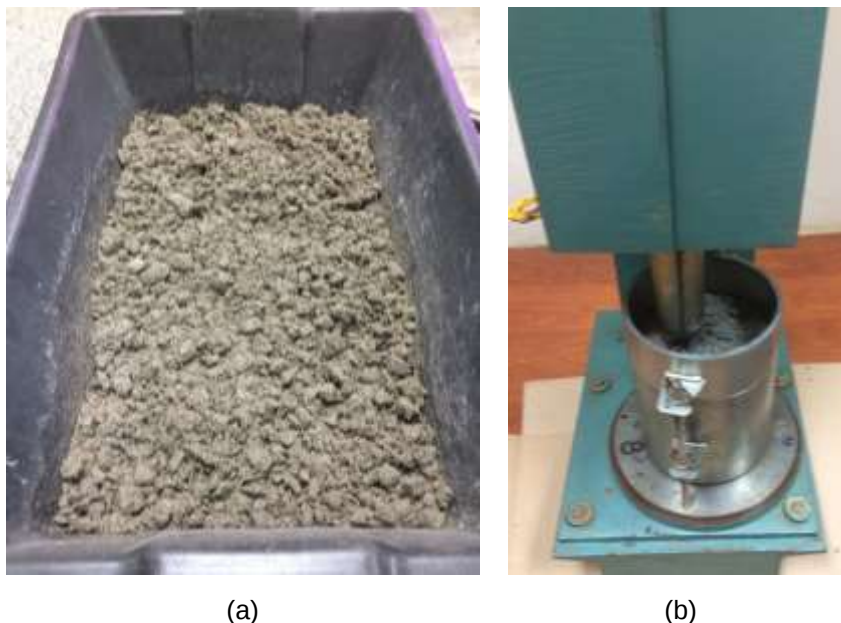
Mistura	Traço unitário
	(cimento: areia de cava: areia de rio: brita 12,5: brita 19: ARC)
CCR-R 200	1,00:1,53:3,06:4,08:1,53:0,00
CCR-5 200	1,00:1,51:3,03:3,79:1,26:0,50
CCR-15 200	1,00:1,48:2,97:3,22:0,74:1,48
CCR-30 200	1,00:1,44:2,88:2,44:0,00:2,88

3.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR

A etapa seguinte a de dosagens das misturas, consistiu em realizar os ensaios de compactação, em conformidade à NBR 7182 (ABNT, 2016b), com reuso de material. Para realização do ensaio, todos os agregados estavam na condição seca. Quanto à substituição do agregado graúdo por ARC nas misturas CCR-5, CCR-15 e CCR-30, foi observada a NBR 6457 (ABNT, 2016c) em relação ao desprezo dos grãos retidos na peneira de 19 mm, haja vista que a porcentagem de material retida era inferior a 10%, em relação à massa.

As misturas foram produzidas em três etapas: na primeira, foram adicionadas as britas e/ou o ARC com um terço de água; na segunda, adicionou-se a areia e mais um terço de água; por fim, acrescentou-se o cimento e o restante da água, sendo que entre essas três etapas era realizada a homogeneização da mistura antes de adicionar os outros materiais. Tendo sido feita a homogeneização final das misturas (Figura 17a), elas eram submetidas à moldagem do corpo de prova (150 x 300 mm), em 5 camadas, com 65 golpes por camada, correspondente à energia intermediária de Proctor, em um compactador mecânico (Figura 17b).

Figura 17 - Ensaio de compactação do CCR: (a) homogeneização das misturas; (b) compactador mecânico



A adoção da energia de compactação intermediária de Proctor diz respeito à aplicação do material para base de pavimentos. Ela deve ser adotada quando se utiliza um agregado reciclado para camadas de pavimento, de acordo com a NBR 15115 (ABNT, 2004a).

3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a execução dos ensaios de compactação das misturas de CCR para obtenção das respectivas umidades ótimas, deu-se seguimento à etapa de moldagem dos CP. Todos os agregados utilizados na produção de CCR encontravam-se no estado seco. Além disso, foi separada a fração de grãos de ARC retida na peneira de 19 mm, tendo em vista que em todo o processo de dosagem, essa parcela do agregado reciclado foi desprezada. Isso porque a prática de limitação da $D_{m\acute{a}x}$ do agregado na mistura é importante para o CCR e esse procedimento também foi adotado por Borré (2017).

As misturas foram produzidas em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade máxima de 120 litros. Antes de iniciar o processo de mistura de CCR no equipamento, realizou-se a umidificação da betoneira com o objetivo de prevenir que a água de amassamento fosse absorvida pela cuba. Em seguida, foram adicionados

os materiais previamente pesados para composição do CCR, seguindo a ordem já definida durante a etapa do ensaio de compactação.

Portanto, seguindo o processo de mistura utilizado também por Borré (2017), foram adicionados os agregados graúdos (britas e/ou ARC) com um terço de água referente à umidade ótima da mistura e acionada a betoneira por um minuto. Por conseguinte, adicionava-se a areia com mais um terço de água e se acionava a betoneira por mais um minuto. Por fim, eram acrescentados o cimento e o restante da água e se ligava a betoneira por mais dois minutos. Decorrido o tempo de mistura, realizava-se uma inspeção visual com intuito de verificar a homogeneidade da mistura e moldavam-se os corpos de prova.

Alguns registros fotográficos do processo de moldagem estão apresentados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Registro de etapas da moldagem de CP cilíndricos



Em todas as moldagens, a energia de compactação adotada foi a intermediária, para aplicação em bases de pavimentos. Os CP cilíndricos de tamanho reduzido (100 x 200 mm) foram moldados em três camadas, com 32 golpes por camada, calculados a partir da Equação 2. Já, os corpos de prova prismáticos (100 x 100 x 550 mm) foram

moldados em duas camadas, com 163 golpes por camada, de acordo com a Equação 2 também.

Figura 19 - Registro da moldagem de CP prismáticos



Após a compactação manual dos corpos de prova, eles foram cobertos com um plástico para evitar a perda de umidade. Decorridas 24 horas, para os CP cilíndricos, ou 48 horas para os prismáticos, como recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2016a), os CP foram desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida, em tanque com água, saturada em hidróxido de cálcio e temperatura constante em 23 ± 2 °C, até a idade de realização dos ensaios mecânicos.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Após as moldagens das misturas de CCR, foi realizado o desmolde e a cura dos CP. Os testemunhos foram submetidos aos ensaios de RCS, RTD, RTF, módulo de elasticidade e da massa específica, absorção de água e índice de vazios.

É importante ressaltar que o número limitado de CP foi devido ao volume restrito de materiais disponíveis para pesquisa, tempo de execução do programa experimental e disponibilidade de recursos humanos para moldagem. Isso fez com que alguns resultados ficassem restringidos, especialmente em relação às análises estatísticas.

3.5.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Consoante à NBR 5739 (ABNT, 2018), 6 CP foram ensaiados para cada mistura de CCR. Para cada mistura, 3 CP eram rompidos à idade de 7 dias e 3 na idade de 28 dias.

Os CP foram retirados do tanque onde estavam sob efeito de cura úmida, no dia do ensaio, suas bases foram retificadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016a) e então submetidos à prensa hidráulica. O valor de RCS foi calculado por meio da Equação 9.

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

Onde:

f_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a força máxima alcançada, em N;

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

3.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para a realização desse ensaio, foram rompidos para cada mistura de CCR, 6 CP, às idades de 7 e 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011). Segundo a norma, não havendo o dispositivo que facilita o posicionamento dos CP na prensa, os corpos de prova devem ser marcados diametralmente com linhas retas, de modo que elas fiquem contidas no mesmo plano axial. Em seguida, com o auxílio de duas tiras de madeira (250 x 15 x 3,5 mm), o CP deve ser posicionado entre os pratos da prensa e submetido a uma carga contínua até a ruptura.

A Equação 10 foi utilizada para os cálculos dos resultados deste ensaio e a Figura 20 ilustra a realização dele.

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

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;
 F é a força máxima obtida no ensaio, em N;
 D é o diâmetro do corpo de prova, em mm;
 l é o comprimento do corpo de prova, em mm.

Figura 20 - Ensaio de RTD

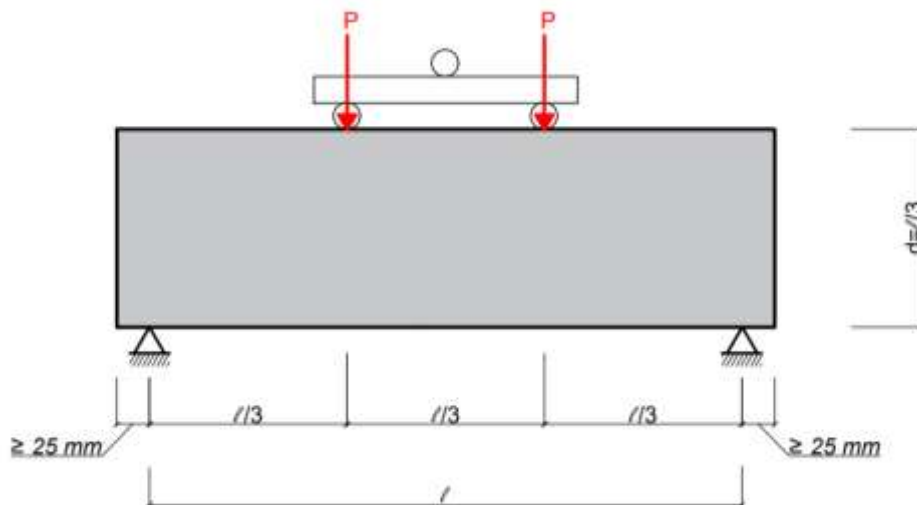


3.5.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

Quanto à execução do ensaio de resistência à tração na flexão, foi utilizada a norma NBR 12142 (ABNT, 2010). Para cada mistura de CCR, foram ensaiados 4 CP, às idades de 7 e 28 dias, retirados do tanque de cura somente no dia do ensaio.

Foram submetidas ao ensaio, vigas de 100 x 100 x 550 mm. Se observada a norma supracitada, ela recomenda (Figura 21) que a dimensão básica (d) do CP seja igual a um terço do vão do ensaio (l) e que o balanço da viga seja, minimamente, igual a 25 mm. Desse modo, as duas cargas do ensaio de quatro pontos são aplicadas equidistantes, separadas entre si, a uma distância igual a um terço do vão do ensaio. Ou seja, o valor de d do CP é condizente às distâncias de aplicação do carregamento e a um terço do vão do ensaio.

Figura 21 - Esquema do ensaio de RTF segundo a NBR 12142



Fonte: ABNT (2010)

Onde:

P é a carga aplicada.

d é a dimensão básica do CP, em mm;

l é o vão do ensaio, em mm.

Todavia, a NBR 12142 (ABNT, 2010) faz referência à NBR 5738 (ABNT, 2018) quanto às dimensões admissíveis dos CP para realização do ensaio. Segundo a NBR 5738 (ABNT, 2018), os CP prismáticos devem ter seção transversal quadrada e para cada dimensão básica, há um comprimento mínimo a ser observado, além de um vão de ensaio que é indicado pela NBR 12142 (Tabela 15).

Assim, a partir da Tabela 15 e da Figura 21, depreende-se que um CP prismático de 100 x 100 x 550 mm (dimensões das formas utilizadas para moldagem dos CP prismáticos desta pesquisa) atenderia, em parte, às normas supracitadas. Ou seja, ele atendia ao requisito de dimensão básica e comprimento mínimo, recomendados pela NBR 5738 (ABNT, 2018), mas não ao vão de ensaio regulamentado pela NBR 12142 (ABNT, 2010).

Todavia, Cervo (2004) estudou o comportamento à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentos. Em sua tese, foram analisados a ruptura à fadiga de um concreto convencional e de um Concreto de Alto Desempenho (CAD). Além da prática convencional com tensão constante para determinação da resistência à fadiga de concretos, foram realizados ensaios com tensões variáveis, nos quais se

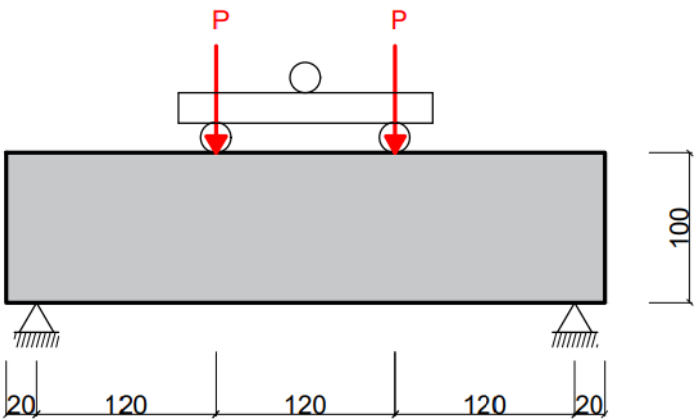
verificaram os efeitos decorrentes da variação de frequência de aplicação das cargas. Também foram ensaiados CP saturados e de tamanho reduzido à época, com dimensões iguais a 100 x 100 x 400 mm, com esquema de ensaio explanado na Figura 22.

Tabela 15 - Dimensões do CP prismático segundo a NBR 5738

Dimensão básica (mm)	Comprimento mínimo (mm)	Vão de ensaio
100	350	300
150	500	450
250	800	750
450	1400	1350

Fonte: ABNT (2018)

Figura 22 - Esquema de RTF com CP prismático reduzido, com dimensões em mm



Fonte: Cervo (2004).

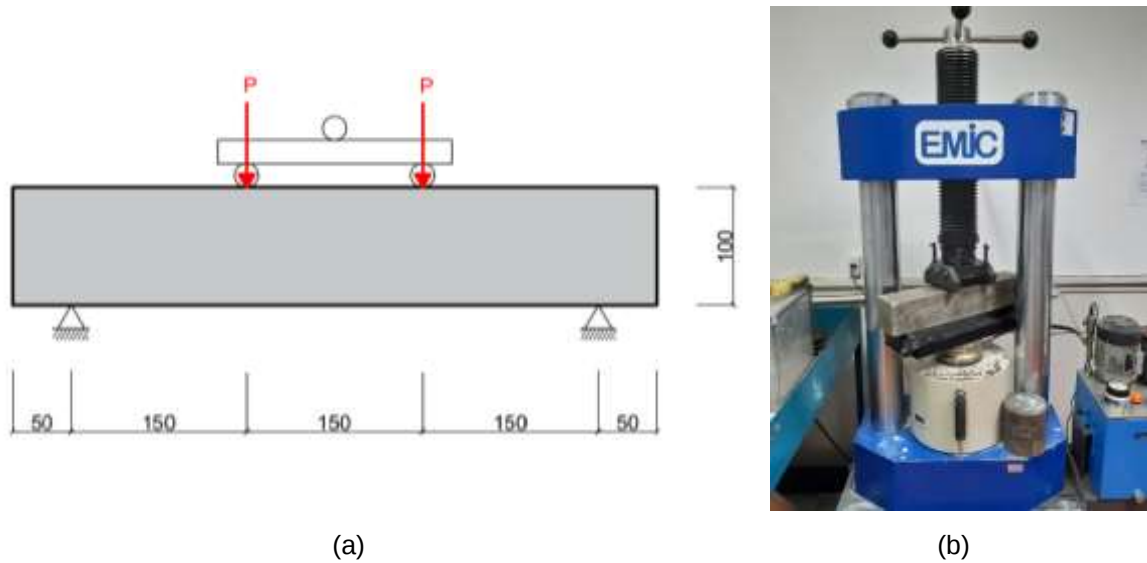
Com o foco apenas nos resultados obtidos por Cervo (2004) referentes às dimensões do CP prismático, pôde-se observar que é viável a utilização de CP com dimensões reduzidas para realização de RTF sem a necessidade de fatores de correção quando comparados os resultados atingidos para CP de 150 x 150 x 500 mm e 100 x 100 x 400 mm. Ademais, a utilização do CP de tamanho reduzido inferiu uma economia de 64% de material para moldagem.

Nessa perspectiva, se observada a Figura 22, evidencia-se que o CP de tamanho reduzido, avaliado por Cervo (2004) atende às recomendações de dimensão básica e comprimento mínimo da NBR 5738 (ABNT, 2018), mas está em dissonância

com a NBR 12142 (ABNT, 2010), a qual recomenda um vão de ensaio igual a 300 mm e o vão de ensaio utilizado pela autora foi igual a 360 mm.

Não obstante, nesta pesquisa, os CP prismáticos submetidos ao ensaio de RTF atenderiam às recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2018), mas o vão de ensaio para as dimensões desse CP não atendem àquele recomendado pela NBR 12142 (ABNT, 2010) e, portanto, o esquema de aplicação do carregamento está evidenciado na Figura 23a. Embora o tamanho dos CP prismáticos não esteja em consonância à norma citada, a qual recomenda que $d \geq l/3$, Effting (2004) utilizou CP com as mesmas dimensões para determinação do Módulo de Elasticidade e da Tensão de Ruptura à Flexão de CAD com 10% de substituição da massa de cimento por cinza de carvão, proveniente de uma usina termoeletrica.

Figura 23 - Ensaio de RTF: (a) CP de dimensões em mm; (b) realização do ensaio



Por fim, para executar o ensaio, o maior lado paralelo ao eixo longitudinal do CP foi alocado sobre os apoios, centrando-o entre eles. Caso a ruptura ocorresse dentro do terço médio, a resistência à tração na flexão era calculada pela Equação 11, caso a ruptura do CP ocorresse fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% do vão entre apoios, a Equação 12 seria utilizada para o cálculo da RTF.

$$f_{ct,f} = \frac{F.l}{b.d^2} \quad (11)$$

$$f_{ct,f} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (12)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, em MPa;

F é a força máxima obtida no ensaio, em N;

l é a dimensão do vão entre apoios, em mm;

b é a largura média do corpo de prova, em mm;

d é a altura média do corpo de prova, em mm;

a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em mm.

3.5.4 Módulo de elasticidade

Para realização dos ensaios de módulo de elasticidade foram submetidos à compressão, 3 CP cilíndricos de 100 x 200 mm, aos 28 dias de cura. Na lateral dos espécimes, foram fixados com uma cola à base de Cianoacrilato, *strain gages* de 10 Ω de resistência (Figura 24a). Assim, durante o ensaio (Figura 24b), coletavam-se as deformações ocorridas no CP mediante a aplicação da carga. A coleta de dados foi realizada através de um sistema de aquisição de dados disponível no LMCC (Figura 24c).

A partir dos dados coletados, traçou-se o gráfico de tensão deformação e em seguida, uma reta secante iniciada entre a origem do gráfico até o ponto corresponde a 40% da carga de ruptura na curva de tensão deformação do material.

Para efeitos de cálculo, foi utilizada a Equação 13 para se estimar o módulo de elasticidade secante dos CP.

$$E_s = \frac{\sigma_{40\%}}{\varepsilon_{40\%}} \quad (13)$$

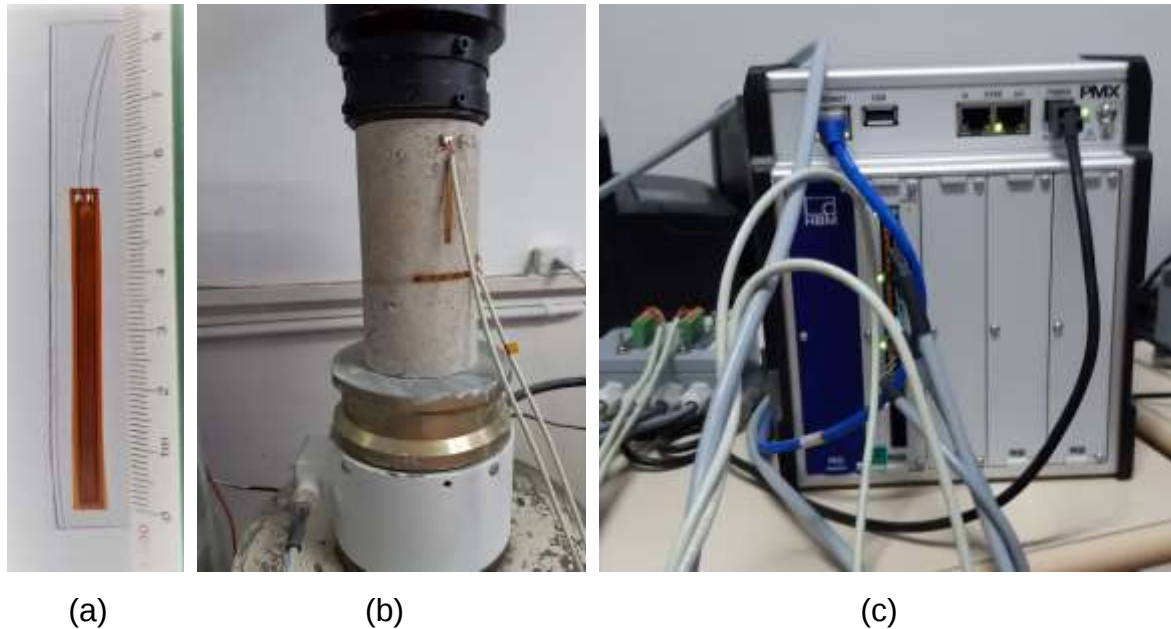
Onde:

E_s é o módulo de elasticidade secante, em GPa;

$\sigma_{40\%}$ é a tensão correspondente a 40% da tensão de ruptura, em MPa;

$\varepsilon_{40\%}$ é a deformação correspondente a 40% da tensão de ruptura do material, em %.

Figura 24 - Ensaio do módulo de elasticidade: (a) *Strain gage*; (b) detalhe da execução do ensaio; (c) sistema para aquisição de dados.



3.5.5 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009c), para determinação da massa específica das misturas de CCR endurecido, à idade de 28 dias, foram utilizados 2 CP cilíndricos, com volume mínimo de concreto, estabelecido por norma, igual a 1500 cm³, tendo em vista que os agregados utilizados no preparo apresentavam $D_{\text{máx}} \leq 50$ mm.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A análise estatística em relação aos resultados obtidos nos experimentos foi conduzida de duas maneiras: a primeira, referente a uma análise de variância para identificar possíveis interferências nas propriedades mecânicas do CCR devido à inserção de ARC nas misturas; a segunda, referente à identificação de relações lineares entre as propriedades mecânicas e físicas das misturas, com o intuito de identificar se alguma propriedade é diretamente dependente de outra ou não.

3.6.1 Análise de Variância

Com o intuito de verificar a influência do ARC nas propriedades mecânicas do CCR, os dados obtidos no programa experimental foram tratados estatisticamente. Para tanto, foi utilizado o *software* R Studio (R CORE TEAM, 2017), buscando realizar um teste de hipóteses e Análise de Variância (ANOVA), desde que comprovado o atendimento aos pressupostos da ANOVA: normalidade dos dados, igualdade de variância entre as amostras e a independência das amostras. Para todas as variáveis respostas (RCS, RTD, RTF e E), considerando como fatores controláveis a porcentagem de substituição dos agregados naturais graúdos por ARC e o tempo de cura, foram aplicadas ANOVA nas propriedades mecânicas aferidas das misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³. A ANOVA para misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³ foi aplicada apenas para RCS aos 7 e 28 dias, considerando os mesmos fatores controláveis das misturas de 200 kg/m³ de cimento.

Consoante a Montgomery e Runger (2018) o teste de hipóteses é um procedimento estatístico para tomada de decisões. Nele, são delineadas duas afirmações, ou seja, duas hipóteses: a hipótese nula (H₀) foi considerada igual a média calculada para cada propriedade do CCR e a hipótese alternativa (H₁) foi considerada diferente da média. Dessa forma, o teste foi realizado de modo bilateral. O nível de significância (α) adotado foi de 5%, referente à probabilidade de se cometer um erro de tipo I, ou seja, rejeitar H₀ quando essa for verdadeira (BUSSAB; MORETTIN, 2010). Via de regra, se a probabilidade de significância (p) for maior que o nível de significância, $p > \alpha$, aceitava-se H₀, e podia ser concluído que a incorporação de ARC naquela propriedade do CCR (resistência à tração indireta, por exemplo) não teve significativa influência. Em contrapartida, se foi verificado que $p \leq \alpha$, rejeitava-se H₀ e se admitia que a adição de ARC ao CCR tinha significativa influência em determinada propriedade do concreto.

Todavia, antes de se calcular a ANOVA para os resultados experimentais, era verificado se os dados apresentavam uma distribuição normal ou, minimamente, uma aproximação à distribuição normal. Para verificar a normalidade de uma distribuição, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, o qual considerava H₀ como se os dados pertenciam a uma distribuição normal e H₁ como se os dados não pertenciam a uma distribuição normal, conseqüentemente, se $p > \alpha$, aceitava-se H₀ e se $p \leq \alpha$, rejeitava-se H₀.

Sendo verificada a significativa diferença estatística entre médias através da ANOVA, sabia-se que ao menos uma das médias diferia das demais. Entretanto a ANOVA por si só não é capaz de identificar quais médias eram diferentes. Para conseguir visualizar tais diferenças foi necessário aplicar um método de múltiplas comparações (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Portanto, para quaisquer propriedades mecânicas analisadas do CCR, nas quais aceitava-se H1 na ANOVA, aplicava-se o teste de Tukey, com o objetivo de identificar quais médias diferenciavam-se entre si.

3.6.2 Análises de regressão linear simples

A análise de regressão linear nada mais é que um método estatístico embasado na relação entre duas ou mais variáveis, de tal maneira que uma das variáveis pode ser estimada em função da outra variável ou das outras, a partir de um modelo empírico. Para se ajustar modelos de regressão linear simples, necessita-se de uma variável preditora (x) e outra dependente ou simplesmente variável resposta (y), de acordo com Montgomery e Runger (2018). Logo, a partir dos resultados aferidos experimentalmente para as misturas de CCR, foram estabelecidas relações lineares entre as propriedades mecânicas do concreto aos 28 dias: RCS e RTD; RCS e RTF; RCS e E; RTD e RTF; RTD e E; RTF e E. Bem como entre as propriedades físicas no estado fresco: umidade ótima e massa específica aparente seca máxima (sendo somente esta relação linear ajustada para as misturas de CCR com consumo de cimento igual a 120 kg/m³).

Além disso, foram estabelecidas relações lineares entre massa específica aparente seca máxima e densidade do CCR endurecido; massa específica aparente seca máxima e porosidade do CCR endurecido; RCS aos 28 dias e porosidade do CCR endurecido; e RCS aos 28 dias e densidade do CCR endurecido.

Assim, um modelo de regressão linear simples, tipicamente assume a forma da Equação 14, na qual, segundo Montgomery e Runger (2018), y é a variável resposta, β_0 é o coeficiente linear, β_1 é o coeficiente angular e x é a variável preditora.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (14)$$

As adequações dos modelos de regressões lineares simples foram avaliadas pelos coeficientes de determinação (R^2) e pelas probabilidades de significância observadas a partir dos valores P. Para essa análise, comparou-se o P valor com o nível de significância adotado de 0,05.

3.7 DIMENSIONAMENTO DE SEÇÕES DE PAVIMENTO

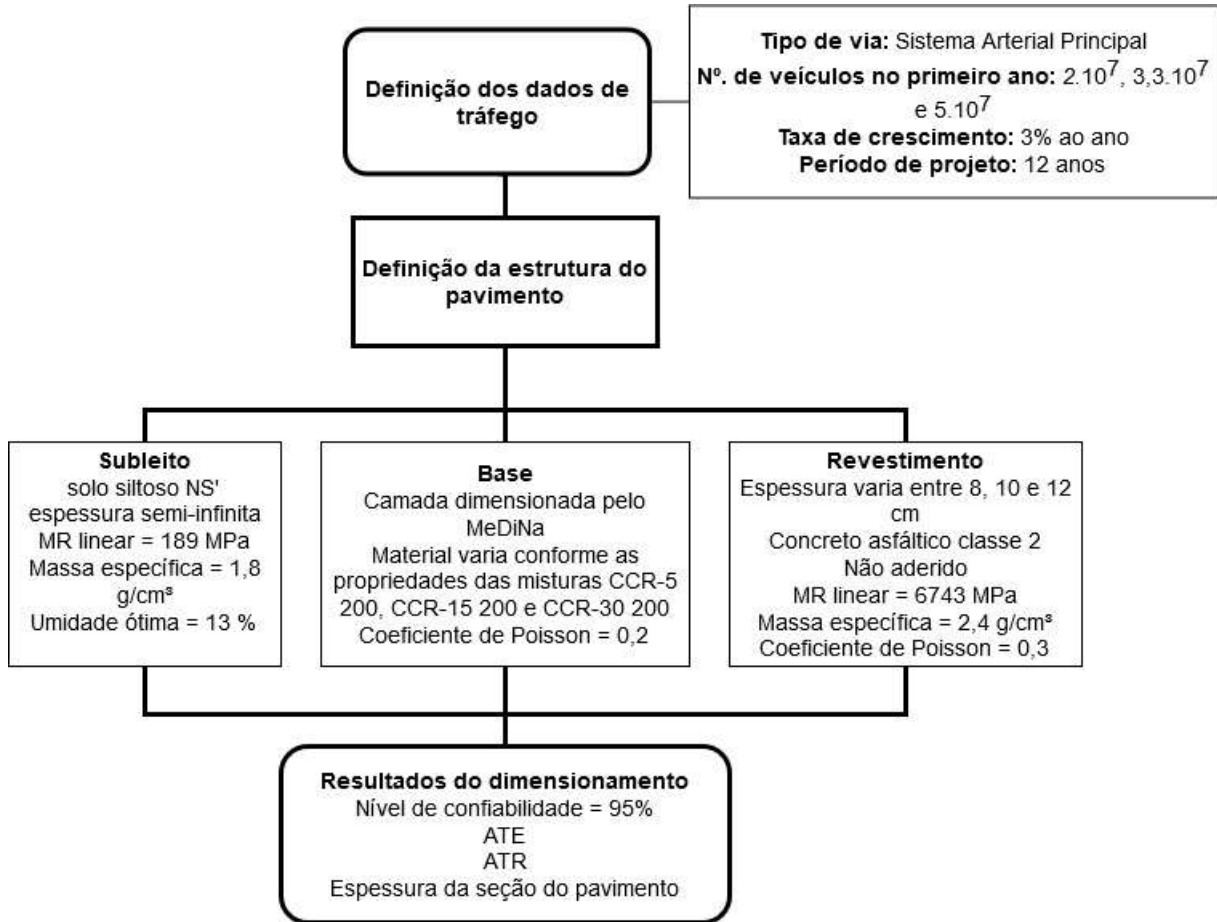
Nessa etapa da pesquisa, foram dimensionadas seções de pavimento, a partir do método de dimensionamento empírico-mecanicista MeDiNa. Foi avaliado o comportamento das seções no próprio *software*, comparando os danos acumulados por Afundamento das Trilhas de Roda (ATR) e porcentagem de Área Trincada Estimada (ATE) do pavimento no fim do período de projeto, estimados por modelos de previsão próprios do MeDiNa.

Partindo da lógica de dimensionamento do MeDiNa, embasada em Franco (2007) e segundo o manual de utilização do *software* (FRANCO; MOTTA, 2018), as propriedades mecânicas dos materiais empregados nas camadas de revestimento e do subleito foram mantidas constantes entre as seções e suas propriedades foram adotadas em consonância às sugestões do programa. Assim, foram variadas as propriedades (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, massa específica aparente seca e coeficiente de Poisson) do material da camada de base, provenientes dos resultados da parte experimental desta pesquisa para cada mistura de CCR. Dessa forma, foram dimensionadas diferentes seções, com a base em CCR, variando as propriedades mecânicas do material da base para cada uma das misturas dosadas no programa experimental. Ademais, as condições de tráfego foram inalteradas para todas as seções.

Utilizando modelos de previsão de desempenho do pavimento, já disponíveis no MeDiNa, foram comparados estatisticamente os resultados verificados entre as seções dimensionadas, referentes ao ATR e ATE, estimados para 12 anos, horizonte de projeto adotado em relação ao volume de tráfego pesado, como cita Balbo (2007). Essas análises possuem um nível de confiabilidade de 95%, característico do próprio *software* relativo ao tipo de via para o qual foram realizados os dimensionamentos: Sistema Arterial Principal.

A Figura 25 apresenta um desenho esquemático referente ao processo de dimensionamento das seções de pavimento no MeDiNa.

Figura 25 - Desenho esquemático dos dimensionamentos no MeDiNa



Um exemplo de seção de pavimento dimensionado no MeDiNa, encontra-se na Figura 26. Nesse caso, foi utilizado um revestimento de concreto asfáltico com classe 2, uma base cimentada a partir das propriedades do CCR-R 200 e o subleito de solo siltoso. Esse tipo de subleito foi selecionado devido à presença de solos siltosos na região de Joinville. Os materiais referentes ao revestimento e o subleito utilizados no exemplo da Figura 26 são os mesmos materiais adotados para os demais dimensionamentos.

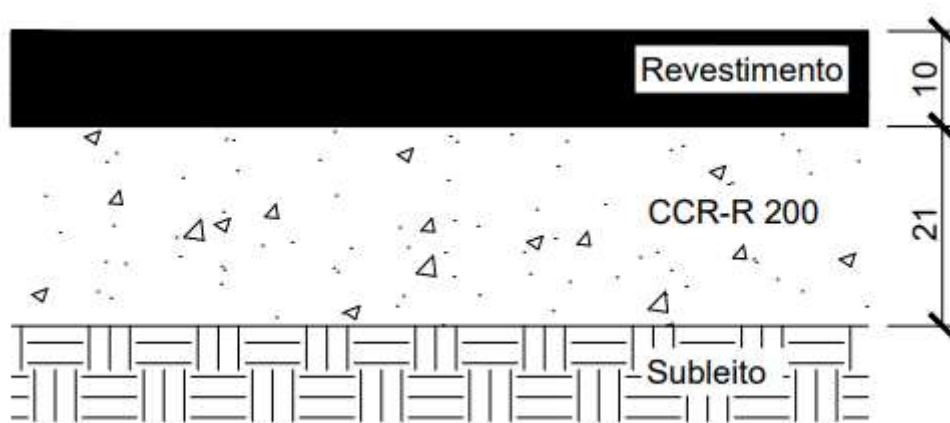
O tipo de revestimento em concreto asfáltico com classe 2 foi escolhido em detrimento de um tipo classe 1 porque possui mais teor de asfalto, inferindo assim e maior durabilidade e resistência à fadiga. Esperava-se que uma mistura de classe de fadiga 2 sobre uma base de CCR fosse suficiente para atender aos critérios de parada do MeDiNa (ATE = 30% e ATR = 10 mm, de acordo com o tipo de via).

Consoante a Fritzen *et al.* (2019), a delimitação da classe de fadiga da mistura asfáltica no projeto de pavimento vai de encontro à metodologia de dimensionamento mecanicista, MeDiNa. Os autores recomendam que no momento de se executar a

camada asfáltica, o construtor faça um estudo laboratorial de traço, com o intuito de verificar se a mistura atende aos critérios da classe delimitada em projeto ou se possível, supere as propriedades daquela classe.

Considerando o dimensionamento com a camada de base a partir da mistura CCR-R 200, a dimensão da camada resultou igual a 20,7 cm no *software*, mas por questões de executabilidade do projeto, adotou-se a espessura da base como 21 cm. Para um nível de confiança de 95%, referente ao Sistema Arterial Principal, número N igual a 5.10^7 veículos no primeiro ano e taxa de crescimento igual a 3%, foram estimados, através do MeDiNa, para a seção da Figura 26, uma ATE = 28,4% e ATR = 0,5 mm.

Figura 26 - Exemplo de seção dimensionada, com espessuras em cm



3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SEÇÕES DE PAVIMENTO

Com o intuito de realizar uma comparação estatística para os resultados obtidos no MeDiNa, referentes ao ATR e ATE das seções genéricas de pavimento e, concomitante evidenciar a aplicabilidade do material dosado na parte experimental da pesquisa, buscou-se realizar um planejamento fatorial completo, 3^3 com réplica. Ou seja, foram considerados 3 fatores em 3 níveis. Os resultados foram replicados, e a ordenação foi aleatorizada, visando minimizar os efeitos de variações de respostas obtidas nas simulações do MeDiNa. Nesta etapa foram consideradas as variáveis independentes, sendo: o número N do primeiro ano, a altura da camada de revestimento asfáltico e a porcentagem de ARC contida na camada de base. As

variáveis dependentes foram: a espessura total da seção do pavimento, Área Trincada Estimada (ATE) do pavimento no fim do período (12 anos) e o Afundamento da Trilha de Roda (ATR).

O primeiro fator diz respeito à altura da camada de revestimento. Essa camada foi variada, com o intuito de se dimensionar a camada de base, entretanto o material de insumo foi constante e adotado dentre os materiais sugeridos no *software*. As espessuras adotadas no planejamento foram de 8, 10 e 12 cm de revestimento em concreto asfáltico Classe 2. Logo, as propriedades desse material, disponibilizadas no banco de dados do próprio MeDiNa, eram: coeficiente de Poisson igual a 0,3, módulo resiliente linear de 6743 MPa e massa específica igual a 2,4 g/cm³.

O segundo fator foi referente ao número N de veículos do ano de abertura da pista ao tráfego, sendo adotados os valores prescritos por Balbo (2007), como: $2 \cdot 10^7$, $3,3 \cdot 10^7$ e $5 \cdot 10^7$, referentes ao volume de tráfego pesado ($2 \cdot 10^7$) e muito pesado ($3,3 \cdot 10^7$ e $5 \cdot 10^7$), podendo, no caso, o número $N = 5 \cdot 10^7$, ser considerado um tráfego muito pesado para corredor de ônibus. Além disso, foi adotada também uma taxa de crescimento de tráfego igual a 3% para todos os números N, a qual é comum ser adotada quando variáveis socioeconômicas são desconhecidas, segundo o DNIT (2006b).

O terceiro fator refere-se à porcentagem de ARC incorporada ao CCR. Ou seja, o terceiro fator foi referente às propriedades mecânicas das misturas de CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200, aferidas no programa experimental desta pesquisa. Optou-se nesse momento em não trabalhar com as propriedades do CCR-R porque a ideia foi de utilizar o ARC na execução da base e como a mistura de referência não tem tal fração, seria desnecessário considerá-la nessa etapa.

A partir desse planejamento estatístico, foram gerados os gráficos pertinentes à Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), bem como gráficos de superfície de contorno, capazes de estimar os danos na seção de pavimento. Também se podia estimar porcentagens de incorporação de ARC nas misturas de CCR, diferentes daquelas pesquisas (5%, 15% e 30%) sem que se extrapolasse os limites de danos admissíveis nas seções de pavimento, referentes à porcentagem de área trincada na superfície do revestimento ao fim da vida útil do projeto e afundamento de trilha de roda (Tabela 8). Todo esse planejamento experimental relativo ao delineamento da MSR para análise das seções de pavimento foi realizado em uma versão acadêmica do *software* Statistica (TIBCO, INC., 2020).

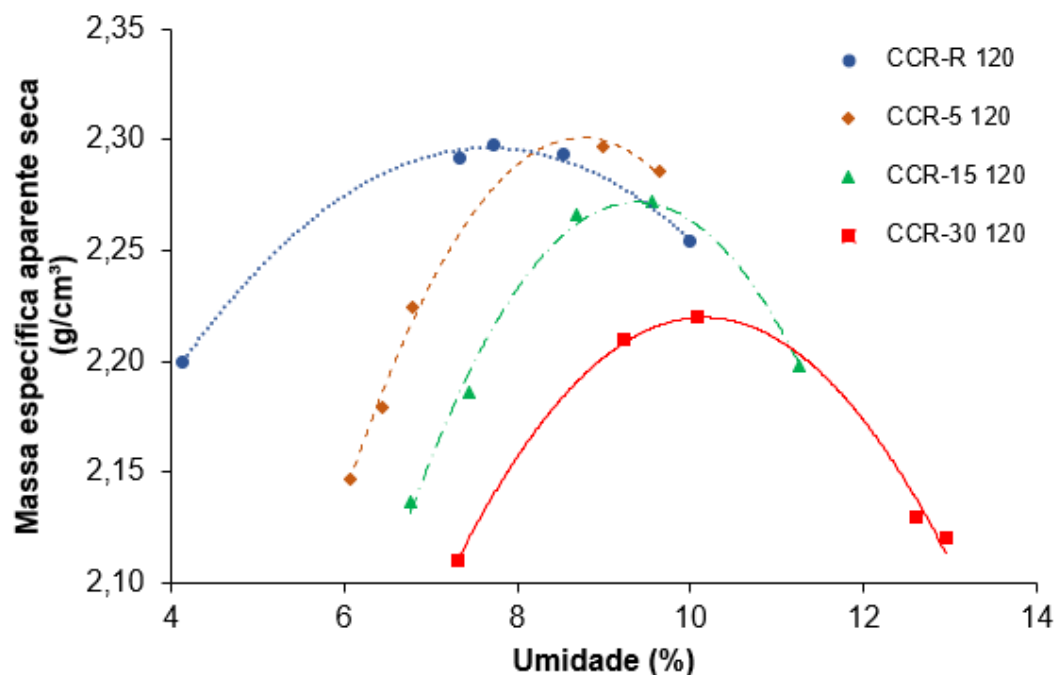
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados na etapa experimental da pesquisa. Por conseguinte, eles foram discutidos e comparados com resultados de pesquisas de outros autores. Além disso, também são apresentadas as análises estatísticas referentes às dosagens das misturas e os resultados obtidos através da MSR, referentes aos dimensionamentos de seções de pavimentos.

4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR

Os ensaios de compactação foram realizados para todas as misturas de CCR. As curvas de compactação das misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m^3 estão apresentadas na Figura 27, enquanto para as misturas com 200 kg/m^3 , estão apresentadas na Figura 28.

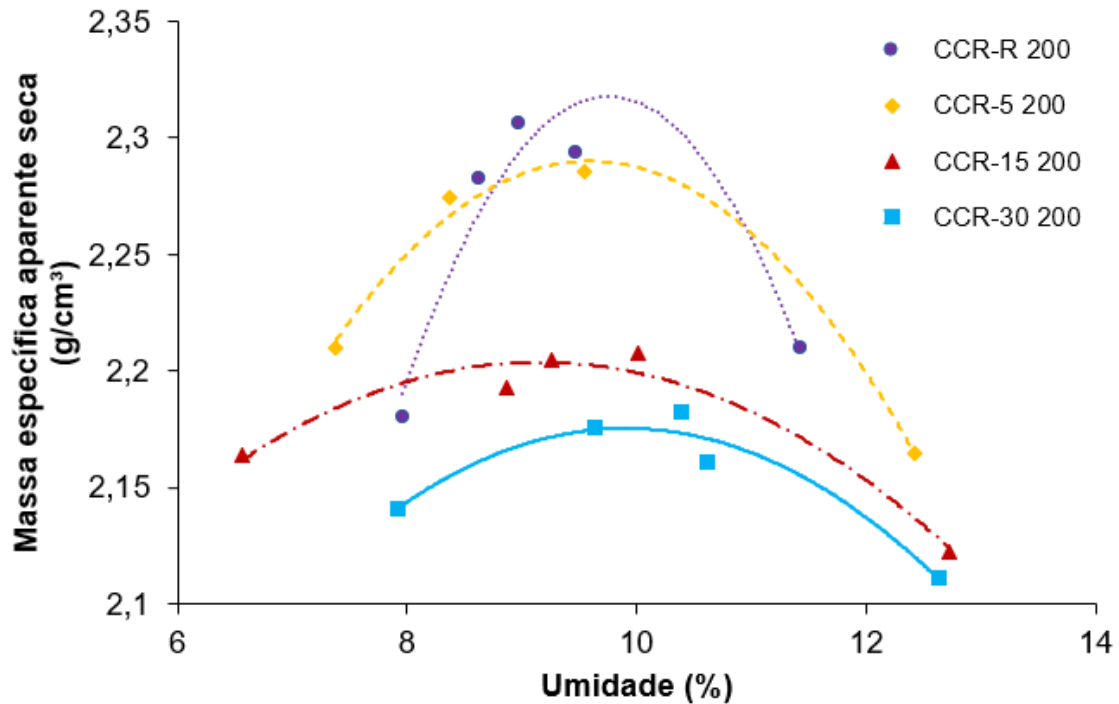
Figura 27 - Curvas de compactação para CCR com 120 kg/m^3 de cimento



Tanto na Figura 27 quanto na Figura 28 pode-se evidenciar que o aumento da porcentagem de ARC na mistura tende a aumentar a umidade ótima e reduzir a massa específica aparente seca máxima. Tal interferência nessas propriedades do CCR no estado fresco, provocada pelo aumento da porcentagem de ARC na mistura já era

esperada devido às propriedades físicas do agregado reciclado, o qual, em comparação aos naturais, apresenta maior absorção de água e menor massa específica.

Figura 28 - Curvas de compactação para CCR com 200 kg/m³ de cimento



A Tabela 16 apresenta as equações referentes às curvas de compactação das misturas e os devidos coeficientes de determinação (R^2) para equações quadráticas expostas nas Figuras 27 e 28. Pode-se observar que todas as equações apresentadas nessa tabela, apresentam bons valores de R^2 , acima de 0,9, indicando um bom ajuste da curva de compactação aos pontos obtidos no ensaio de compactação.

Na Tabela 17 encontram-se os resultados de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das misturas. Percebe-se que os valores de massa específica aparente seca variam pouco entre si. Tais valores seguem similares àqueles apresentados por Lopez-Uceda *et al.* (2016), os quais variaram entre 2,19 e 2,34 g/cm³ para consumos de cimento entre 110 e 350 kg/m³, com a substituição de agregados naturais por ARC, em volume. Borré (2017) encontrou valores de massa específica aparente seca entre 2,188 e 2,304 g/cm³, para CCR com consumo de cimento de 100 e 150 kg/m³ e com adição ou não de RAP.

Tabela 16 - Equações para ajuste das curvas de compactação

Mistura	Equação	R ²
CCR-R 120	$y = -0,0077x^2 + 0,1181x + 1,8427$	0,9970
CCR-5 120	$y = -0,0215x^2 + 0,3768x + 0,6519$	0,9944
CCR-15 120	$y = -0,0206x^2 + 0,3862x + 0,4611$	0,9904
CCR-30 120	$y = -0,0136x^2 + 0,2758x + 0,8195$	0,9905
CCR-R 200	$y = -0,0395x^2 + 0,7703x - 1,4387$	0,9236
CCR-5 200	$y = -0,0157x^2 + 0,3011x + 0,8462$	0,9907
CCR-15 200	$y = -0,0063x^2 + 0,1147x + 1,6789$	0,9643
CCR-30 200	$y = -0,0087x^2 + 0,1726x + 1,3206$	0,9421

Tabela 17 - Resultados do ensaio de compactação

Mistura	Umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
CCR-R 120	7,80	2,295
CCR-5 120	9,00	2,302
CCR-15 120	9,20	2,271
CCR-30 120	9,80	2,216
CCR-R 200	9,41	2,309
CCR-5 200	9,56	2,290
CCR-15 200	9,71	2,204
CCR-30 200	9,89	2,203

Diversas pesquisas já evidenciaram que a massa específica aparente seca máxima tende a diminuir com o aumento de agregados reciclados (RICCI; BALBO, 2009; PINTO, 2010; SACHET, 2012; LOPEZ-UCEDA *et al.*, 2016; BORRÉ, 2017). Todavia, dependendo das propriedades físicas e mecânicas do resíduo, outras ponderações podem ser feitas em relação às propriedades físicas das misturas de CCR. Por exemplo, Borré (2017) observou que as misturas de CCR com 10% de RAP em substituição, em massa, do agregado graúdo resultou no aumento da massa específica aparente seca das misturas com consumos de cimento iguais a 100 kg/m³ e 150 kg/m³. Por outro lado, nas misturas com 30% de RAP, o CCR apresentou um

aumento no valor da massa específica aparente seca apenas na mistura com consumo de cimento igual a 100 kg/m³ e uma redução dessa propriedade na mistura com consumo de cimento igual a 150 kg/m³.

Além disso, Ricci (2007) observou que o CCR com RCD apresentava exsudação no momento da compactação e para solucionar esse problema, passou a moldar os CP com um 1% a menos do valor de umidade ótima das misturas (ou seja, com a umidade no ramo seco da curva de compactação). Sachet (2012) também observou que suas misturas de CCR com RAP apresentavam problema de exsudação no momento da compactação devido à poropressão provocada pelo excesso de água nos poros no agregado reciclado.

Quanto à umidade ótima, já se conjecturava um aumento desses valores entre as misturas, especialmente para aquelas com maior porcentagem de ARC. Todavia esse aumento ficou mais evidente nas misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³, onde se percebeu uma variação de 2% entre a mistura de referência e a mistura com maior porcentagem de ARC. Todavia, Trichês (1993) e Borré (2017) concordam que a umidade ótima das misturas de CCR esteja próxima a 6,5%, ou seja, todas as misturas estudadas nessa pesquisa estariam com valores de umidade ótima acima do comum. Porém, valores elevados de umidade ótima, também acima de 6,5% já foram empregados em outras pesquisas, como as misturas de CCR com RAP, de Sachet (2012), as quais variaram entre 7,50% e 8,40%; as misturas de Ricci (2007), de CCR com RCD variando a umidade ótima entre 8,40% e 10,00%; as misturas de CCR com agregados naturais, estudadas por Fedrigo, Rosa e Núñez (2014), as quais variaram entre 7,25% e 11,00%.

É importante ressaltar também que as misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ apresentavam maior porcentagem de agregado miúdos que as misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³. Esse fato sustenta a diferença de valores de umidade ótimas observadas entre as misturas com diferentes consumos e tipos de cimentos. Portanto, comparando os valores de umidade ótima das misturas de referência, a demanda de água requerida para compactação da mistura CCR-R 200 (9,41%) é maior porque utiliza um tipo de cimento com partículas mais finas e maior consumo que o CCR-R 120, além de apresentar uma fração de areia de cava ($D_{máx} = 1,2 \text{ mm}$) que a outra mistura não possui.

4.2 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados de massa específica, absorção de água e índice de vazios das misturas de CCR com 200 kg/m³ de cimento estão apresentados na Tabela 18. Comparando numericamente esses resultados, percebe-se que o CCR-30 200 apresentou maior porcentagem de absorção de água, maior índice de vazios e menor valor de massa específica dentre todas as misturas. Isso explica, em partes, o porquê de esse CCR ter também apresentado, na maioria das comparações, as menores médias de propriedades mecânicas.

Tabela 18 - Propriedades físicas das misturas de CCR

Mistura	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)
CCR-R 200	5,829 (0,865)	13,532 (1,675)	2,690 (0,014)
CCR-5 200	5,209 (0,174)	12,309 (0,430)	2,695 (0,017)
CCR-15 200	5,757 (0,305)	13,268 (0,671)	2,657 (0,014)
CCR-30 200	6,660 (0,197)	15,005 (0,419)	2,651 (0,008)

Considerando a mistura de referência (CCR-R 200), foram percebidas variações de -10,63%, -1,24% e +14,26%, respectivamente para CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200 na absorção de água; também foram verificados variações no índice de vazios de -20,75%, -1,95% e +10,88%, respectivamente para as misturas com 5%, 15% e 30% de ARC; por fim, as médias de massa específica apresentaram variações de +0,19%, -1,23% e -1,45%, respectivamente para CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30. Essas variações não apresentam uma tendência de redução ou aumento das propriedades físicas devido à incorporação de ARC na mistura.

Todavia, se contrastados os resultados de massa específica do CCR no estado endurecido com o resultado de massa específica aparente seca máxima, percebe-se que as misturas CCR-R 200 e CCR-5 200 apresentam pouca diferença nos valores médios dessas propriedades físicas: 2,309 g/cm³ e 2,290 g/cm³ para massa específica aparente seca máxima, respectivamente e de 2,690 g/cm³ e 2,695 g/cm³ para massa específica no estado endurecido, respectivamente. Outrossim, com uma redução dessas propriedades físicas em relação as outras duas já citadas, as misturas de

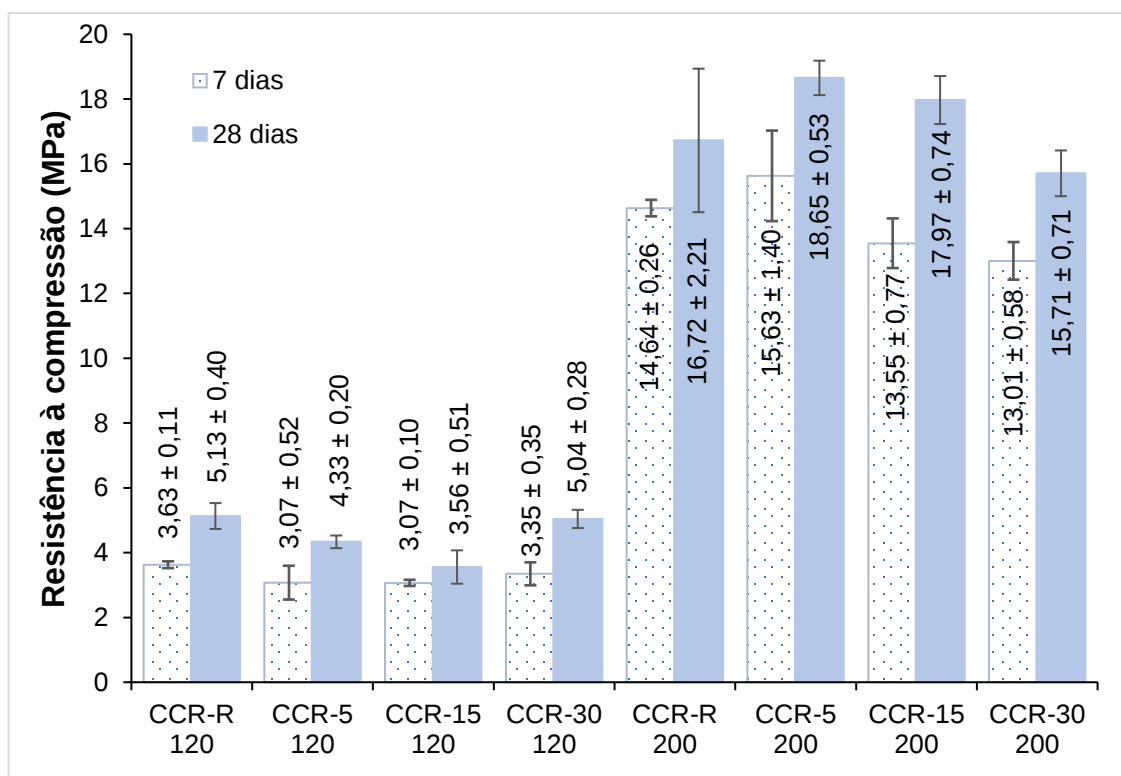
CCR-15 200 e CCR-30 200 apresentaram médias próximas dessas propriedades. As massas específicas aparente secas máximas foram iguais a 2,204 g/cm³ e 2,203 g/cm³, respectivamente, enquanto as massas específicas observadas no estado endurecido foram iguais a 2,657 g/cm³ e 2,651 g/cm³.

Enquanto o índice de vazios, dos CCR desta pesquisa, variou entre 12,309% e 15,005%, para Lopez-Uceda *et al.* (2016) a variação ocorreu entre 9,69% e 19,01%. Demonstrando assim, que a variação dessas misturas se encontra dentro do intervalo de variação observado por aqueles autores.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados de RCS, em MPa, para as idades de 7 e 28 dias, consoante à NBR 5739 (ABNT, 2018), estão apresentados na Figura 29, onde se visualiza a média da RCS com o respectivo desvio padrão. Por conseguinte, a Tabela 19 apresenta os resultados individuais dos CP das misturas com 120 kg/m³ de cimento e a Tabela 20 apresenta os valores individuais das misturas com 200 kg/m³ de cimento.

Figura 29 - Resultados de RCS



Era esperado que, similar às misturas de CCR com ARC, analisadas por Courard, Michel e Delhez (2010), Lopez-Uceda *et al.* (2016) ou de Lopez-Uceda *et al.* (2018), se verificasse uma progressiva redução dos valores de RCS à medida em que se aumentasse a porcentagem de ARC à mistura. Observando e comparando os resultados médios de RCS para as misturas de CCR com consumo de cimento igual a 120 kg/m³, não se pode evidenciar uma tendência de redução da propriedade mecânica proporcional ao aumento da porcentagem de ARC na mistura.

Por exemplo, aos 28 dias, a RCS das misturas CCR-R 120 e CCR-30 120 apresentaram médias respectivas de 5,13 MPa e 5,04 MPa, o que teoricamente, não deveria ter ocorrido. Afinal, era esperado que a média de RCS da mistura CCR-30 120 fosse menor que de todas as outras médias das misturas devido à maior porcentagem de ARC no CCR, com base nos resultados das pesquisas de Courard, Michel e Delhez (2010), Lopez-Uceda *et al.* (2016) e Lopez-Uceda *et al.* (2018).

Percebe-se que as médias de RCS para as misturas de CCR com consumo de cimento igual a 120 kg/m³ não atendem aos requisitos mínimos para aplicação do material em camada de sub-base ou base (Tabela 3). Isso justificou a necessidade de se dosar uma mistura de CCR com melhores propriedades mecânicas, aplicável à base de pavimentos. As misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ nesse caso, foram dosadas com o intuito de se atingir os requisitos normatizados.

Tabela 19 - Resultados de RCS para misturas com 120 kg/m³ de cimento

Mistura	CCR-R 120		CCR-5 120		CCR-15 120		CCR-30 120	
Idade (dias)	7	28	7	28	7	28	7	28
CP 1 (MPa)	3,73	5,15	2,48	4,41	3,16	4,03	3,03	5,15
CP 2 (MPa)	3,63	5,52	3,46	4,48	2,97	3,01	3,28	4,72
CP 3 (MPa)	3,52	4,72	3,28	4,11	3,07	3,63	3,73	5,25
Média (MPa)	3,63	5,13	3,08	4,24	3,07	3,56	3,35	5,04
Desvio padrão (MPa)	0,09	0,33	0,52	0,21	0,08	0,51	0,35	0,28

Em vias de comparação, as misturas de 120 kg/m³ de cimento CP II E 32 RS, com mesmas porcentagens de substituição do agregado graúdo natural por ARC, apresentaram cerca de 20% dos valores médios de RCS das misturas com 200 kg/m³ de cimento CP V ARI RS, para ambas as idades, como se evidencia na Tabela 21. Aliás, se observados os ganhos de resistências entre as idades de 7 e 28 dias para

as misturas com 200 kg/m³ de cimento e compará-las com os ganhos de resistências nas mesmas idades das misturas com 120 kg/m³ de cimento, percebe-se que o ganho de resistência é menor nas misturas de CCR com cimento CP V ARI RS. Isso é devido à particularidade do próprio tipo de cimento que apresenta altas resistências em baixas idades.

Tabela 20 - Resultados de RCS para misturas com 200 kg/m³ de cimento

Mistura	CCR-R 200		CCR-5 200		CCR-15 200		CCR-30 200	
Idade (dias)	7	28	7	28	7	28	7	28
CP 1 (MPa)	14,89	15,03	14,40	18,94	13,34	18,17	13,40	14,95
CP 2 (MPa)	14,38	19,23	17,15	18,04	12,91	17,15	13,28	16,35
CP 3 (MPa)	14,64	15,91	15,34	18,98	14,40	18,59	12,34	15,82
Média (MPa)	14,64	16,72	15,63	18,65	13,55	17,97	13,01	15,71
Desvio padrão (MPa)	0,26	2,21	1,40	0,53	0,77	0,74	0,58	0,71

Tabela 21 - Porcentagens que a RCS das misturas com 120 kg/m³ representam de RCS das misturas com 200 kg/m³

	CCR-R 200		CCR-5 200		CCR-15 200		CCR-30 200	
Idade	7	28	7	28	7	28	7	28
CCR-R 120	24,80	30,68	-	-	-	-	-	-
CCR-5 120	-	-	19,70	22,73	-	-	-	-
CCR-15 120	-	-	-	-	22,66	19,81	-	-
CCR-30 120	-	-	-	-	-	-	25,75	32,08

Observando os resultados de RCS das misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³, depreende-se que a mistura CCR-5 200 alcançou as maiores médias dessa propriedade mecânica em ambas idades (7 e 28 dias). Isso, conduziria à errônea conclusão de que há uma tendência de que baixas porcentagens de ARC tendem a aumentar a RCS do CCR, em comparação à mistura de referência e dentre todas as misturas analisadas, aquela com menor porcentagem de ARC seria a mistura que proveria melhores propriedades mecânicas. Porém, afirmar isso a partir de o resultado de um único ensaio mecânico seria equivocado.

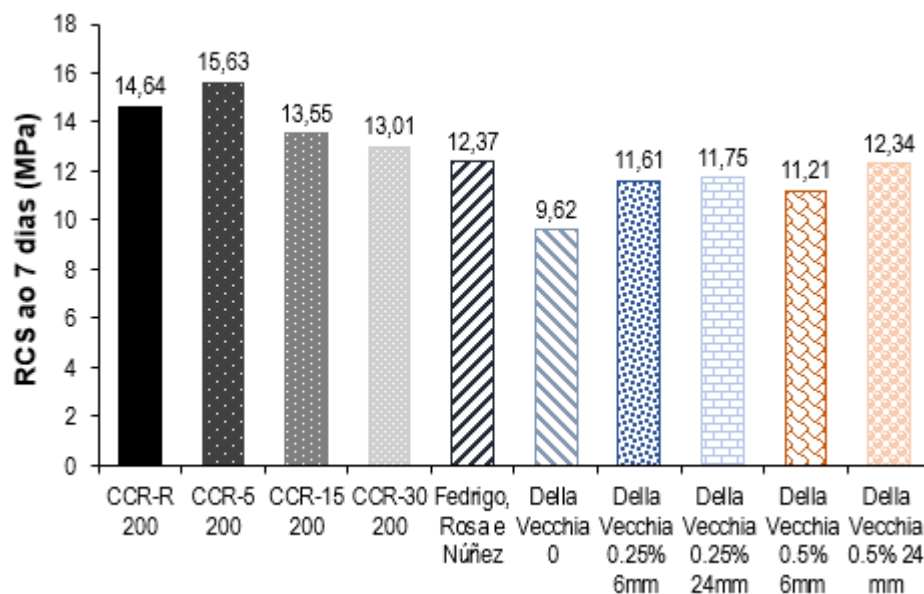
Quanto às misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³, em comparação à mistura de referência (CCR-R 120), foram observadas diferenças de

resistência à compressão aos 7 dias de -15,15% para CCR-5 120, -15,34% para CCR-15 120 e de -7,71% para CCR-30 120. Aos 28 dias, as diferenças foram de -17,35%, -30,60% e -1,75%, respectivamente para CCR-5 120, CCR-15 120 e CCR-30 120.

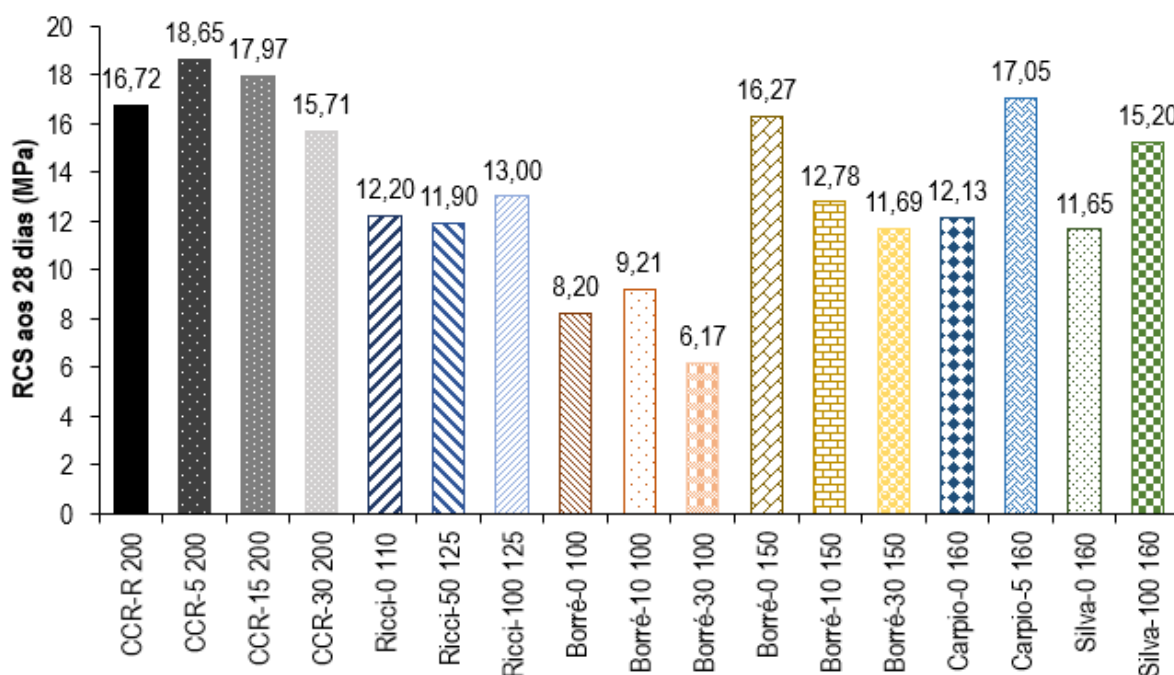
Em relação às misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³, em comparação à mistura de referência (CCR-R 200), as diferenças de resistência à compressão aos 7 dias foram iguais a +6,76%, -7,45% e -11,13%, respectivamente para CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200. Aos 28 dias, as diferenças observadas foram +11,54%, +7,99% e -5,59%, respectivamente para misturas com 5%, 15% e 30% de ARC. Evidenciando novamente que não há uma tendência de aumento ou redução da propriedade mecânica devido à inserção de ARC no CCR.

A Figura 30 estabelece uma comparação numérica entre os valores médios de RCS aos 7 dias desta pesquisa (considerando apenas as misturas com 200 kg/m³ de cimento) com o resultado da pesquisa de Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) acerca de CCR com agregados naturais, teor de cimento CP V ARI igual a 200 kg/m³ e energia de compactação modificada; também são comparados os resultados de Della Vecchia (2013) acerca de CCR com agregados naturais, consumo de cimento CP V ARI igual a 200 kg/m³, energia de compactação modificada e adição de fibras de polipropileno de 6 mm ou 24 mm. A partir dessa comparação, percebe-se que quaisquer misturas de CCR desta pesquisa foram superiores aos das pesquisas dos outros autores, em relação aos valores médios de RCS aos 7 dias, incluindo as misturas com fibras de polipropileno de Della Vecchia (2013).

Além disso, Della Vecchia (2013) e Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) empregaram a energia modificada de compactação, enquanto nesta pesquisa, foi utilizada a intermediária. Dessa forma, era esperado que as médias das propriedades mecânicas das misturas daquelas pesquisas fossem superiores às observadas nesta pesquisa. Afinal, a literatura aponta que as propriedades mecânicas do CCR são bastante influenciadas pela energia de compactação e quando maior for a energia, melhor compactado estará o material e por consequência, mais resistência mecânica alcançará o CCR (ANDRIOLO, 1989; TRICHÊS, 1993; HARRINGTON *et al.*, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 30 - Comparação de médias de RCS aos 7 dias

Em seguida, a Figura 31 apresenta uma comparação numérica entre as médias de RCS aos 28 de misturas de CCR com diferentes consumos de cimento, diferentes tipos de cimento, energia de compactação e até mesmo, diferentes agregados reciclados incorporados à mistura, extraídos a partir das Tabelas 5 e 6. Logo, foram comparadas as misturas de Ricci (2007), moldadas na energia normal de compactação: CCR referência, sem RCD, com consumo de cimento igual a 110 kg/m^3 (Ricci-0 110), CCR com 50% de substituição da fração de brita 0 por RCD e consumo de cimento igual a 125 kg/m^3 (Ricci-50 125) e o CCR com 100% de RCD, com consumo de cimento igual a 125 kg/m^3 (Ricci-100 125); todas as misturas de Borré (2017), moldadas na energia intermediária de compactação, sendo a leitura de suas misturas dada pelo seu nome, seguida pelo número que representa a porcentagem de substituição do agregado grão natural por RAP e o número que representa o consumo de cimento, exemplo: Borré-0 100; as misturas de Carpio (2009) foram moldadas na energia intermediária de Proctor, com consumo de cimento igual a 160 kg/m^3 e substituição do agregado miúdo natural por CCA moída às taxas de 0% (Carpio-0 160) e 5% (Carpio-5 160); por fim, as misturas de Silva (2006) também compactadas na energia intermediária de compactação, com consumo de cimento igual a 160 kg/m^3 e substituição do agregado natural miúdo por cinza pesada, proveniente do processamento de carvão mineral, às taxas de 0% (Silva-0 160) e 100% (Silva-100 160).

Figura 31 - Comparação de médias de RCS aos 28 dias

A Figura 31 evidencia que as misturas desta pesquisa apresentaram os maiores valores de RCS aos 28 dias, junto com as misturas de Borré-0 150 (BORRÉ, 2017), Carpio-5 160 (CARPIO, 2009) e Silva-100 160 (SILVA, 2006), dentre as misturas comparadas. Todavia, deve ser reiterado que as misturas desta pesquisa apresentavam maior consumo de cimento que qualquer outra pesquisa referenciada na Figura 31 e, devido a isso, melhores propriedades mecânicas, especialmente relativas à RCS deveriam ser aferidas, pois é comumente esperado na Engenharia Civil que quanto maior o consumo de cimento, maior será o valor de RCS.

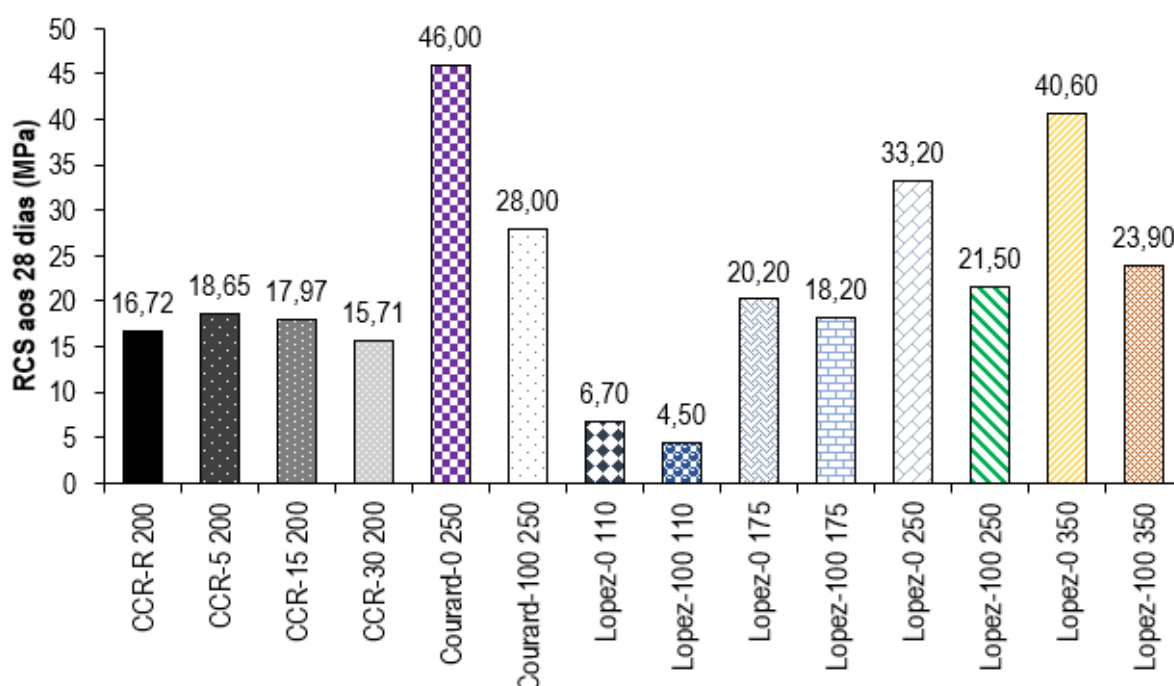
Deve ser ressaltado ainda que a mistura CCR-5 200 foi a que apresentou maior média, igual a 18,65 MPa e a mistura Borré-30 100 apresentou menor média, igual a 6,17 MPa. Contudo, o CCR Borré-30 100 (BORRÉ, 2017) era uma das misturas com maior porcentagem de agregados reciclados, 30% de RAP em substituição aos agregados naturais e menor consumo de cimento, 100 kg/m³ do tipo CP II F 32.

Se considerados os requisitos da PMSP (2004a), sem observar os resultados de RTF das misturas de CCR, todas as misturas de CCR com 200 kg/m³ de cimento e as misturas Borré-0 150 (BORRÉ, 2017), Carpio-5 160 (CARPIO, 2009) e Silva-100 160 (SILVA, 2006) atendem ao mínimo normatizado de 15 MPa aos 28 dias para emprego dos materiais em base de pavimentos. Entretanto, as outras misturas que não alcançaram esse valor de RCS aos 28 dias, não podem ser desconsideradas

como possíveis materiais para base de pavimento, pois a PMSP (2004a) recomenda que majoritariamente seja realizado o ensaio de RTF e somente seja considerado o mínimo valor de $RCS \geq 15$ MPa, caso esse não seja possível realizar o ensaio de RTF.

A Figura 32 apresenta uma comparação de médias entre os resultados de RCS aos 28 dias para as misturas desta pesquisa com misturas de CCR e ARC de pesquisas internacionais. Os dados utilizados para tal comparação são provenientes da Tabela 7, referentes às pesquisas de Courard, Michel e Delhez (2010) e Lopez-Uceda *et al.* (2016), sendo que nessas pesquisas foi utilizada a energia modificada de Proctor para compactação das misturas. Basicamente a nomenclatura das misturas na Figura 31 segue o nome do autor, a porcentagem de ARC na mistura e o consumo de cimento, com exceção das misturas desta pesquisa.

Figura 32 - Comparação de médias de RCS aos 28 dias com resultados de pesquisas internacionais



Nota-se, consoante à Figura 32, que os CCR desta pesquisa alcançaram valores de RCS aos 28 dias superiores apenas às misturas de Lopez-Uceda *et al.* (2016) com consumo de cimento igual a 110 kg/m³. O uso dessas misturas (Lopez-0 110 e Lopez-100 110) para obras civis foi desencorajado pelos próprios autores devido aos baixos resultados aferidos nos ensaios de caracterização mecânica dos concretos (LOPEZ-UCEDA *et al.*, 2016). Outrossim, as misturas desta pesquisa, com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ apresentaram resultados próximos aos

aferidos para as misturas com consumo de cimento igual a 175 kg/m³ de Lopez-Uceda *et al.* (2016).

O CCR que alcançou maior média de RCS aos 28 dias, elencado na Figura 32, foi a mistura de Courard, Michel e Delhez (2010), com consumo de cimento igual a 250 kg/m³ e sem ARC. Média próxima à mistura de CCR de Abreu (2002), que atingiu aos 28 dias, 45 MPa de RCS com uma mistura de 250 kg/m³ de cimento e agregados naturais.

Ainda deve-se ressaltar que normativas de outros países, tendem a requerer valores médios, aos 28 dias mais altos que os brasileiros. Isso faz com que se aumente o consumo de cimento, a energia de compactação, trabalhando quase que estritamente com a energia modificada, reduza-se a umidade ótima da mistura, ou se utilize outra metodologia de dosagem do CCR, na qual se priorize a redução do fator a/c como ocorre na dosagem do concreto convencional. Realizando essas modificações na dosagem do CCR, talvez se alcance melhores propriedades mecânicas capazes de atingir os requisitos para utilização do material em camadas de pavimentos.

Em comparação aos requisitos das normas rodoviárias brasileiras, é comum nos EUA o CCR apresentar RCS aos 28 dias entre 28 MPa e 41 MPa para revestimento (HARRINGTON *et al.*, 2010) ou até mesmo ser adotado o valor mínimo igual a 20 MPa, para revestimento de acordo com a norma francesa (BOUSSETTA; KHAY; NEJI, 2018) e 20 MPa para base com alto tráfego de veículos, segundo a norma espanhola (LOPEZ-UCEDA *et al.*, 2016). Assim, as misturas provenientes de pesquisas internacionais, com teor de cimento igual ou superior a 175 kg/m³ da Figura 32 atenderiam o mínimo de 20 MPa na RCS aos 28 dias, com exceção do CCR com 100% de ARC (Lopez-100 175). Quanto aos valores corriqueiros americanos, quatro misturas atenderiam ao mínimo de 28 MPa: Courard-0 250, Courard-100 250, Lopez-0 250 e Lopez-0 350. Ou seja, das quatro misturas de CCR que estariam dentro dos limites usuais de RCS aos 28 dias para CCR, apenas um CCR com ARC alcançaria o limite mínimo aceitável (28 MPa). Já as misturas desta pesquisa, nem de outras pesquisas nacionais elencadas na Figura 31, atenderiam ao mínimo valor de RCS aos 28 dias, requerido para CCR pelas normas internacionais citadas. Ressalva-se aqui, os resultados obtidos por Abreu (2002), próximos a 45 MPa, que atenderiam a ambos valores mínimos de RCS internacionais supracitados.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 33 apresenta os resultados de RTD com os respectivos desvios padrão. Concomitantemente, a Tabela 22 mostra os resultados individuais por CP e o ganho de resistência das misturas. Em vias de comparação de médias, fica difícil estabelecer uma comparação entre as misturas, haja vista que os resultados estão bastante próximos. Considerando os resultados das pesquisas de Courard, Michel e Delhez (2010), Lopez-Uceda *et al.* (2016) e Lopez-Uceda *et al.* (2018), esperava-se que à medida em que se adicionava maior porcentagem de ARC à mistura, essa propriedade mecânica reduzisse proporcionalmente ao aumento de material reciclado na mistura, mas isso não ficou evidente a partir dos resultados desta pesquisa.

Outro fator interessante é referente à média de RTD da mistura de referência, a qual aos 7 dias, apresentou valor maior que aos 28 dias (Tabela 22), diferentemente das médias das misturas de CCR com ARC. Isso é incomum, pois se esperava que o tempo de cura influenciasse positivamente nas propriedades mecânicas do CCR. Entretanto, se o maior valor encontrado para RTD fosse excluído do cálculo da média da mistura CCR-R 200, a nova média seria 1,85 MPa com desvio padrão igual a 0,05 MPa. Esse valor, em comparação aos demais seria mais coerente, pois haveria um ganho de resistência entre as idades de 7 dias e 28 dias, igual a 3,78%, mais coerente que -95,05%.

Figura 33 - Resultados de RTD

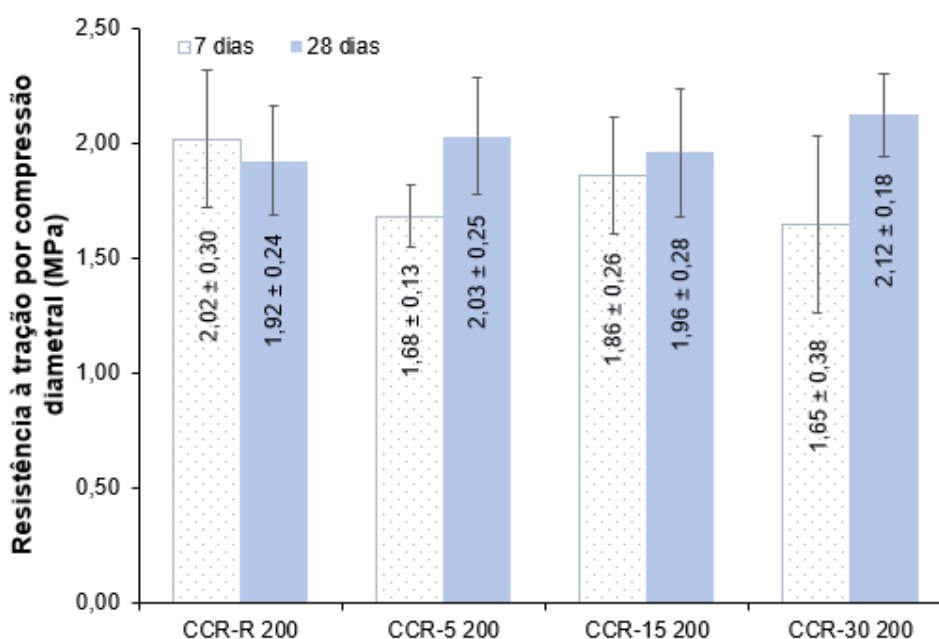


Tabela 22 - Resultados de RTD para as misturas

Mistura	CCR-R 200		CCR-5 200		CCR-15 200		CCR-30 200	
Idade (dias)	7	28	7	28	7	28	7	28
CP 1 (MPa)	1,81	2,13	1,72	2,25	2,08	2,27	2,05	1,96
CP 2 (MPa)	1,88	1,98	1,53	2,08	1,58	1,75	1,29	2,32
CP 3 (MPa)	2,36	1,66	1,79	1,75	1,92	1,85	1,60	2,08
Média (MPa)	2,02	1,92	1,68	2,03	1,86	1,96	1,65	2,12
Desvio padrão (MPa)	0,30	0,24	0,13	0,25	0,26	0,28	0,38	0,18

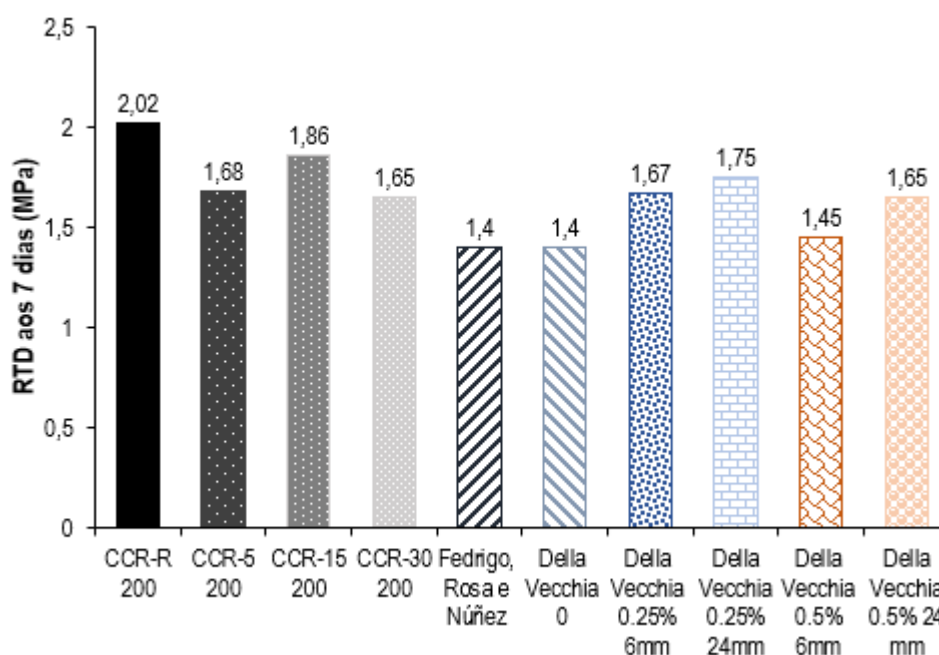
O que certamente resolveria esse problema de médias das propriedades mecânicas, seria a moldagem de mais CP por idade de cada ensaio mecânico. Submetendo apenas 3 CP por idade para mensuração das propriedades mecânicas, fez com os resultados e suas interpretações ficassem muito limitadas. Assim, um provável *outlier*, que poderia ser descartado do cálculo da média, caso houvesse maior número de exemplares, precisou ser considerado quando se trabalhou com poucos CP.

Ao se comparar as médias dos valores de RTD entre si, uma queda desses valores aos 7 dias entre as misturas foi perceptível. Com referência na mistura CCR-R 200, evidenciou-se reduções de -16,83%, -7,92% e -18,32% para CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200, respectivamente. Aos 28 dias, as diferenças foram iguais a +5,73%, +2,08% e +10,42%, respectivamente para as misturas com 5%, 15% e 30% de ARC na mistura. A partir dessa comparação numérica, pode-se afirmar que aos 7 dias, a RTD tende a diminuir em relação à mistura de referência, ante à adição de ARC na mistura. Enquanto aos 28 dias, o efeito é oposto. A RTD parece que tende a aumentar em relação ao CCR referência à medida em que se aumenta a porcentagem de resíduo na mistura.

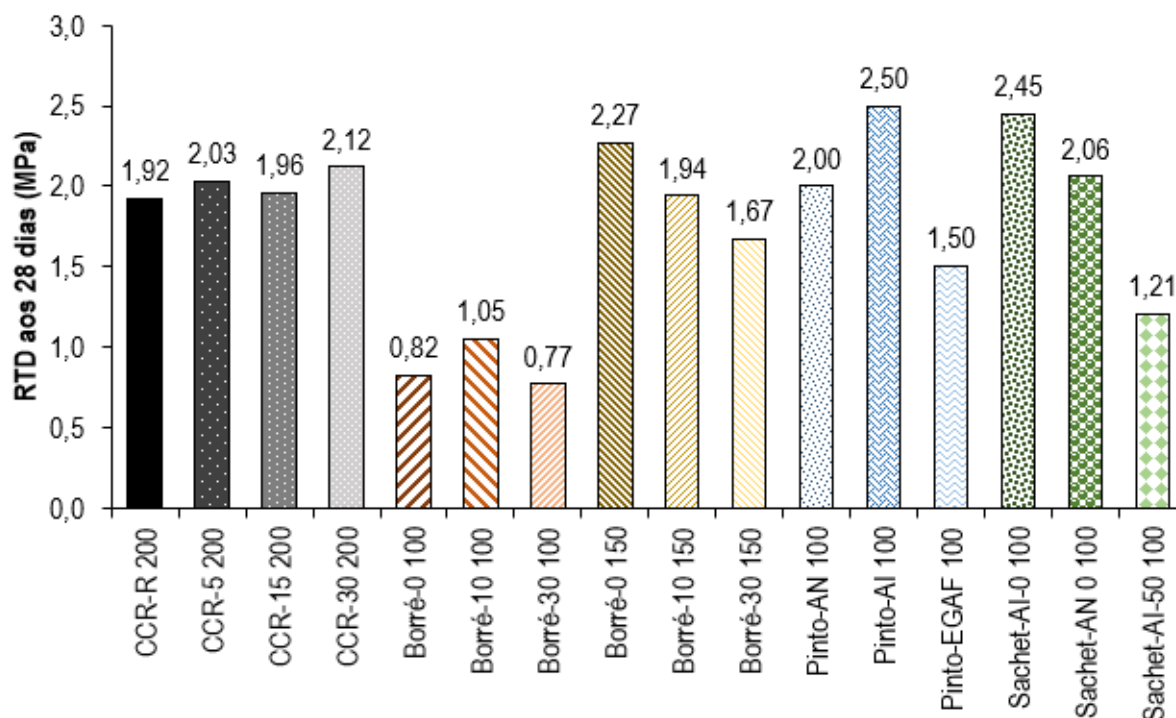
Comparando os valores numéricos de RTD aos 7 dias com aqueles obtidos por Della Vecchia (2013) e Fedrigo, Rosa e Núñez (2014) (Figura 34), percebe-se que diferentemente da RCS, os valores de RTD das diferentes misturas ficam muito próximos. Entretanto, o menor valor de RTD observado nesta pesquisa foi igual a 1,65 MPa, com 30% de ARC enquanto nas outras pesquisas, o menor valor foi de 1,40 MPa com agregados naturais e sem fibras, havendo uma diferença de +17,86% entre tais valores. Ressalta-se que as misturas com fibras de polipropileno de Della Vecchia (2013) alcançaram valores mais elevados de RTD. O que é esperado quando se

adiciona algum tipo de fibra em qualquer tipo de concreto. Porém, nenhuma dessas misturas alcançou a média de RTD do CCR-R 200. A partir disso, pode-se concluir que as médias de RTD aos 7 dias de todas as pesquisas apresentaram valores mais próximos quando se adicionou ARC nas misturas de CCR desta pesquisa e fibras de polipropileno nas misturas de Della Vecchia (2013).

Figura 34 - Comparação de médias de RTD aos 7 dias



A partir da Figura 35, pode-se estabelecer uma comparação numérica de médias para RTD aos 28 dias de pesquisas sobre CCR com diferentes teores de cimento. Os dados para comparação foram extraídos das Tabelas 5 e 6. Para tanto, foram utilizados todas as misturas de Borré (2017); as misturas de Pinto (2010) moldados na energia de compactação normal, com consumo de cimento igual a 100 kg/m³, e utilização de Areia Industrial (Pinto-AI 100), Areia Natural (Pinto-AN 100) e EGAF (Pinto-EGAF 100) na fração miúda de agregados; e por fim, as misturas de Sachet (2012) moldadas na energia normal de compactação, seguindo a mesma lógica de Pinto (2010), entretanto utilizando 50% de RAP na fração de agregados graúdos (Sachet-AI-50 100) e teor de cimento de 100 kg/m³ para todos os CCR. Deve ser ressaltado que as pesquisas de Pinto (2010) e Sachet (2012) realizam o rompimento de seus CP à idade de 35 dias.

Figura 35 - Comparação de médias de RTD aos 28 dias⁸

Como nas normas rodoviárias brasileiras não há um limite mínimo de RTD a ser atingido pelo CCR aos 7 ou aos 28 dias, haja vista que é preferível a execução do ensaio de RTF em detrimento de RTD. Poderia ser observada a resistência mínima requerida pela PMSP (2004a) para a RTF, a qual deve ser maior ou igual a 1,5 MPa aos 28 dias. Nesse caso, quatro misturas comparadas na Figura 35 apresentaram média de RTD aquém de 1,5 MPa: Borré-0 100, Borré-10 100, Borré-30 100 e Sachet-AI-50 100, sendo todas elas com consumo de cimento igual 100 kg/m³ e três delas, empregando frações de RAP em substituição aos agregados naturais graúdos entre taxas de 10%, 30% e 50%.

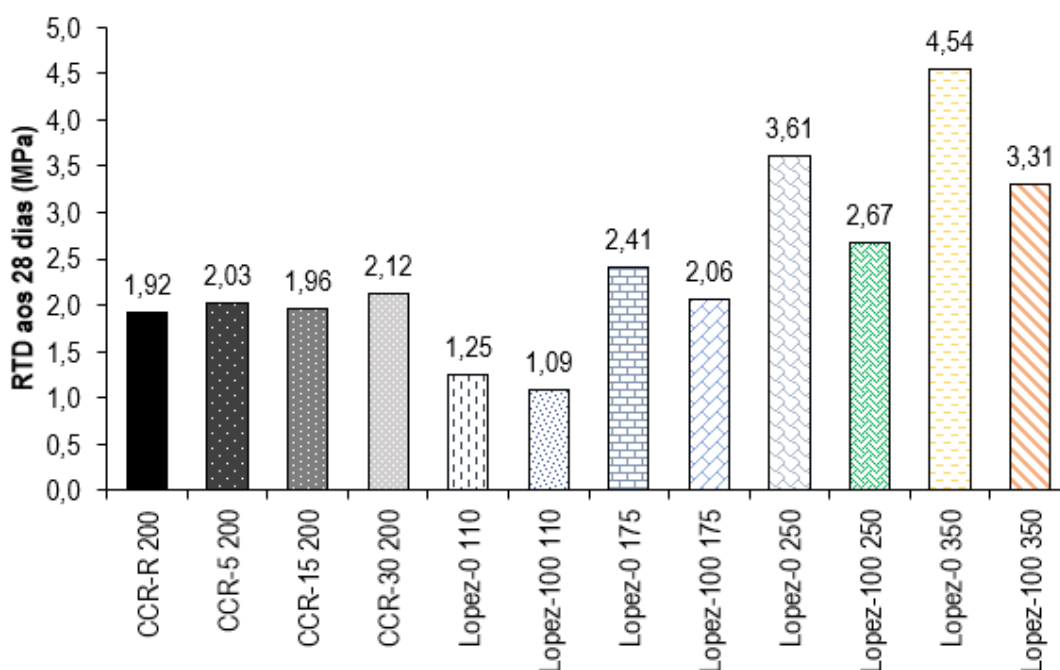
Quanto às normativas internacionais, Boussetta, Khay e Neji (2018) afirmaram que a RTD mínima aos 28 dias para CCR é de 1,6 MPa, de acordo com a normativa francesa. Nesse caso, dentre os CCR da Figura 35, além das misturas que, teoricamente não atenderiam à instrução de projeto da PMSP (2004a), haveria também o não atendimento da mistura Pinto-EGAF 100 (PINTO, 2010) ao valor mínimo de RTD = 1,6 MPa. Esse CCR também apresenta consumo de cimento igual a 100 kg/m³ e a totalidade dos agregados miúdos é composta por EGAF.

⁸ Embora o título da Figura 35 considere o valor de RTD aos 28 dias, as misturas de Pinto (2010) e Sachet (2012) foram ensaiadas aos 35 dias.

Já para a norma espanhola, Lopez-Uceda *et al.* (2016) que CCR com resíduos precisa apresentar aos 28 dias, $RTD \geq 3,3$ MPa para aplicação em base de pavimentos de elevado tráfego. Nessa perspectiva, nenhuma das misturas comparadas na Figura 35 poderia ser aplicada à base de pavimentos com alto volume de tráfego de veículos pesados.

Não obstante, a Figura 36 estabelece uma comparação entre valores médios de RTD aos 28 dias atingidos por misturas de CCR com ARC. Novamente os CCR com consumo de cimento igual a 110 kg/m^3 , com ou sem ARC de Lopez-Uceda *et al.* (2016) não atenderiam aos mínimos de RTD adotados. As demais misturas atenderiam ao mínimo de 1,5 MPa, estipulado por analogia, ao mínimo da RTF requerido pela PMSP (2004a) e ao valor mínimo de 1,6 MPa, da norma francesa, segundo Boussetta, Khay e Neji (2018). Além disso, somente as misturas Lopez-0 250, Lopez-0 350 e Lopez-100 350 atenderiam ao mínimo de $RTD \geq 3,3$ MPa aos 28 dias, requerido pela norma espanhola, como citam Lopez-Uceda *et al.* (2016).

Figura 36 - Médias de RTD para pesquisas acerca de CCR com ARC



4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Figura 37 apresenta os resultados de RTF para as misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m^3 . Enquanto a Tabela 23 apresenta os resultados

por CP. Numericamente comparando os resultados, percebe-se que aos 7 dias todas as misturas com ARC apresentaram RTF média maior que a do CCR referência. Aos 28 dias, a mistura de referência apresentou maior média de RTF, sendo que as misturas com ARC apresentaram uma redução dessa propriedade mecânica em relação ao CCR-R 200.

Figura 37 - Resultados de RTF

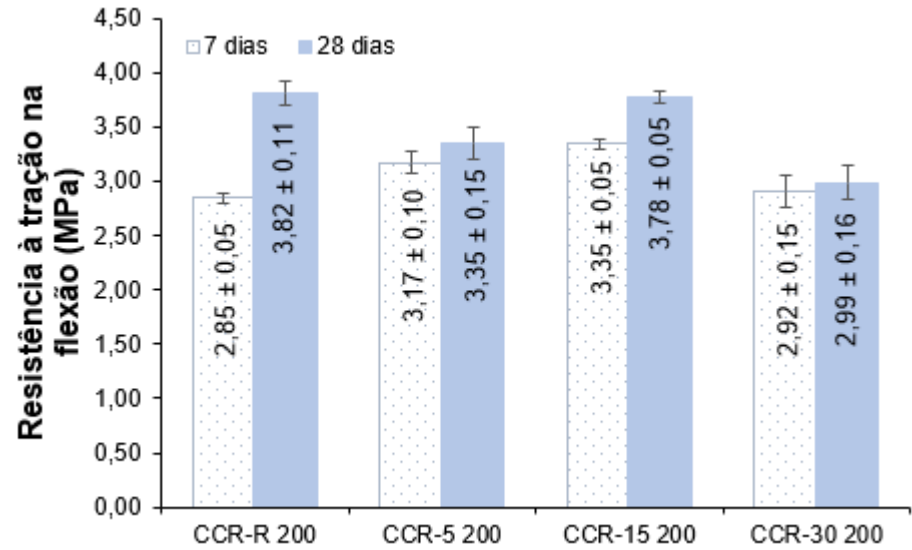


Tabela 23 - Resultados para o ensaio de RTF

Mistura	CCR-R 200		CCR-5 200		CCR-15 200		CCR-30 200	
Idade (dias)	7	28	7	28	7	28	7	28
CP 1 (MPa)	2,88	3,74	3,24	3,24	3,31	3,81	3,02	2,88
CP 2 (MPa)	2,81	3,89	3,10	3,45	3,38	3,74	2,81	3,10
Média (MPa)	2,85	3,82	3,17	3,35	3,35	3,78	2,92	2,99
Desvio padrão (MPa)	0,05	0,11	0,10	0,15	0,05	0,05	0,15	0,16

Portanto, levando-se em consideração os resultados de RTF da mistura CCR-R 200, observou-se um acréscimo aos 7 dias de +11,23%, +17,54% e +2,46%, respectivamente para as misturas com 5%, 15% e 30% de ARC. Enquanto aos 28 dias, o decréscimo observado foi de -12,30%, -1,05% e -21,73% ,respectivamente para as misturas CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200. Novamente, não se evidencia uma tendência de redução ou aumento da propriedade mecânica proporcional ao aumento da porcentagem de ARC nas misturas de CCR.

A Figura 38 apresenta uma comparação entre os valores médios de RTF aos 7 dias de diferentes misturas. Na Figura 39 podem ser observados os valores de RTF aos 28 dias, provindos de diferentes pesquisas, anteriormente citadas nas Tabelas 5, 6 e 7.

Figura 38 - Resultados de RTF aos 7 dias para diferentes misturas de CCR

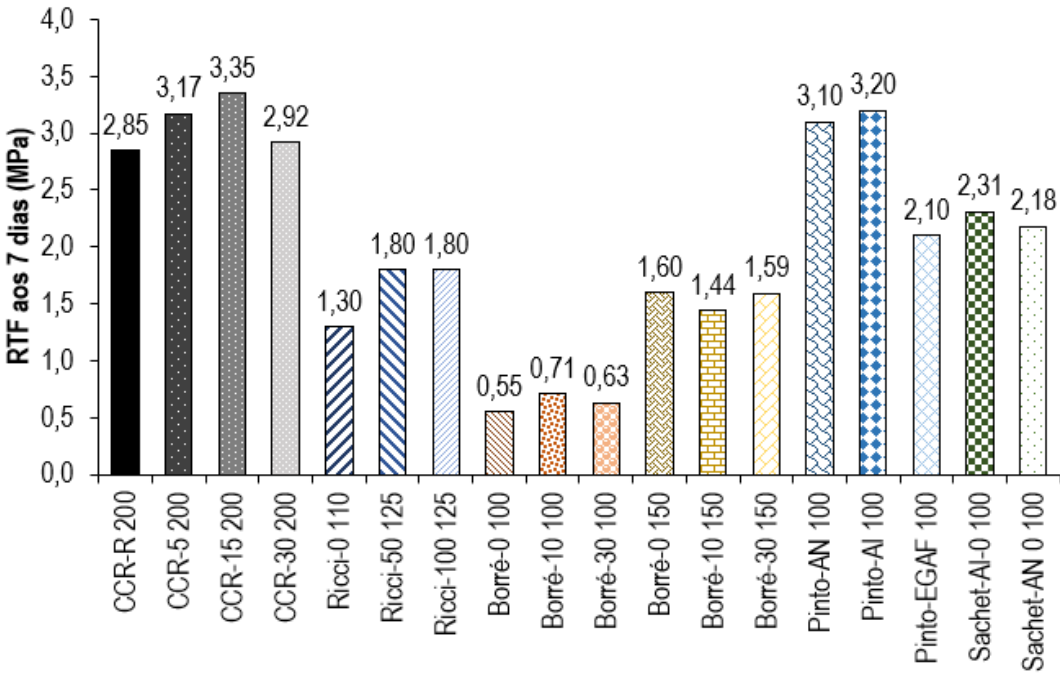
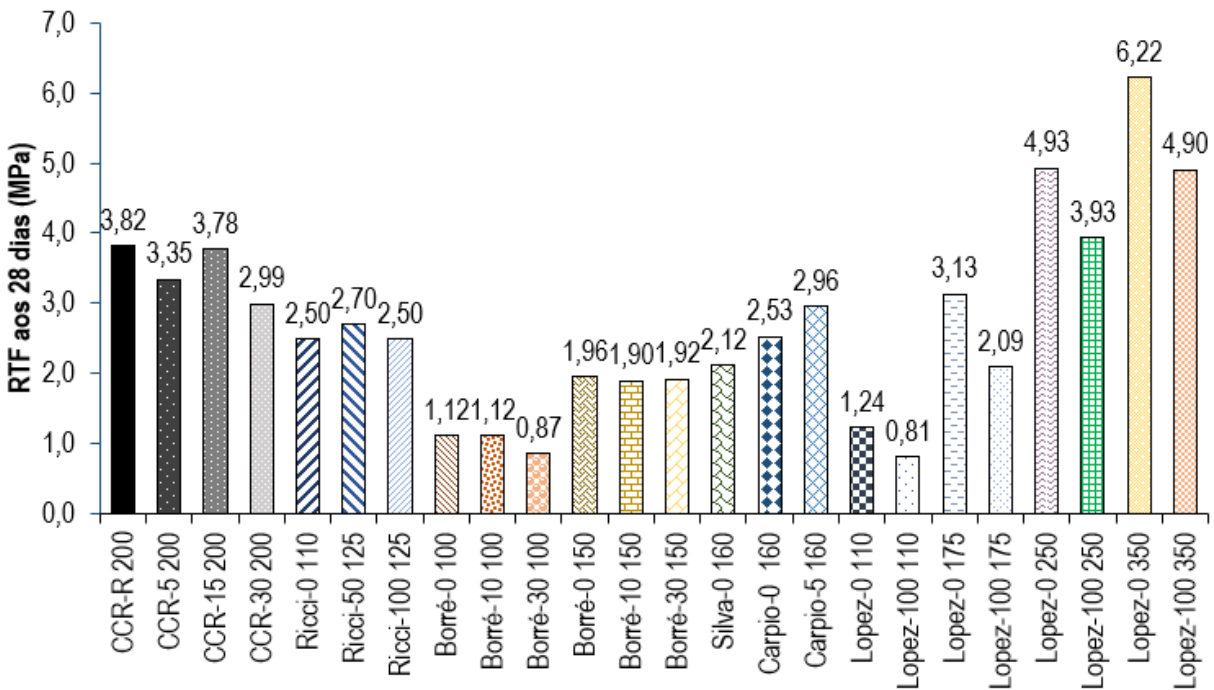


Figura 39 - Resultados de RTF aos 28 dias para diferentes misturas de CCR



Comparando os resultados na Figura 38, percebe-se que o CCR-15 200 alcançou o valor mais alto de RTF aos 7 dias dentre as misturas, enquanto a mistura Borré-0 100 (BORRÉ, 2017) alcançou a média mais baixa. O que, em parte, se deve à grande diferença do teor de cimento entre as misturas.

A contraponto, ao se comparar os resultados de RTF aos 28 dias, das misturas da Figura 39, percebe-se que aquela que apresentou mais elevada média foi Lopez-0 350 e a menor, foi Lopez-100 110, ambas dos autores Lopez-Uceda *et al.* (2016). Percebe-se ainda que não há uma nítida tendência relativa ao ganho de resistência proporcional ao aumento de consumo de cimento, em qualquer idade. Pois misturas com baixos consumo de cimento, como as de Pinto (2010) apresentaram valores de RTF aos 7 dias próximos aos valores dos CCR desta pesquisa, os quais tem o dobro do consumo de ligante.

Não obstante, deve ser observado o atendimento aos mínimos valores requeridos por norma, para aplicação do material em camadas de pavimento. A PMSP (2004a) regulamenta que a média de RTF deve ser igual a 1,5 MPa aos 28 dias. Harrington *et al.* (2010) citaram que esta propriedade geralmente apresenta valores altos em pavimentos de CCR dos EUA, entre 3,5 MPa e 7 MPa. Nessas condições, dentre os CCR comparados na Figura 39, cinco misturas não atenderiam à norma paulista para aplicação do material em base de pavimentos, sendo as misturas com consumo de cimento igual a 100 kg/m³ de Borré (2017) e os CCR com 110 kg/m³ de Lopez-Uceda *et al.* (2016). Observando aquela faixa de valores de RTF usuais estadunidense citada por Harrington *et al.* (2010), somente cinco misturas estariam dentro dos limites: CCR-R 200, CCR-15 200 e as quatro misturas de Lopez-Uceda *et al.* (2016) com consumos de cimento igual ou superior a 250 kg/m³.

4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados para o módulo de elasticidade secante do material estão apresentados na Figura 40. Em comparação ao módulo de elasticidade do CCR de referência, percebe-se uma redução proporcional ao aumento de porcentagem de ARC na mistura. Essas reduções são de -1,40%, -4,38% e -12,97%, respectivamente para CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200, comparados ao CCR-R 200. Quanto aos resultados individuais dos CP, pode-se observá-los na Tabela 24.

Não há em normas rodoviárias brasileiras, um valor mínimo de E, a ser apresentado por esse tipo concreto. Tampouco Harrington *et al.* (2010) citaram algum limite a ser observado para esta propriedade mecânica. Isso inferiria ser desnecessária a realização de tal ensaio, não fosse a necessidade de ter que utilizar essa propriedade para realizar os dimensionamentos de pavimentos no MeDiNa. Embora o método de dimensionamento requeira o MR do material, no caso do CCR, por ser um material cimentado, pode ser considerado $MR = E$ (AYRES, 1997, *apud* FRANCO, 2007).

Figura 40 - Resultados de módulo de elasticidade

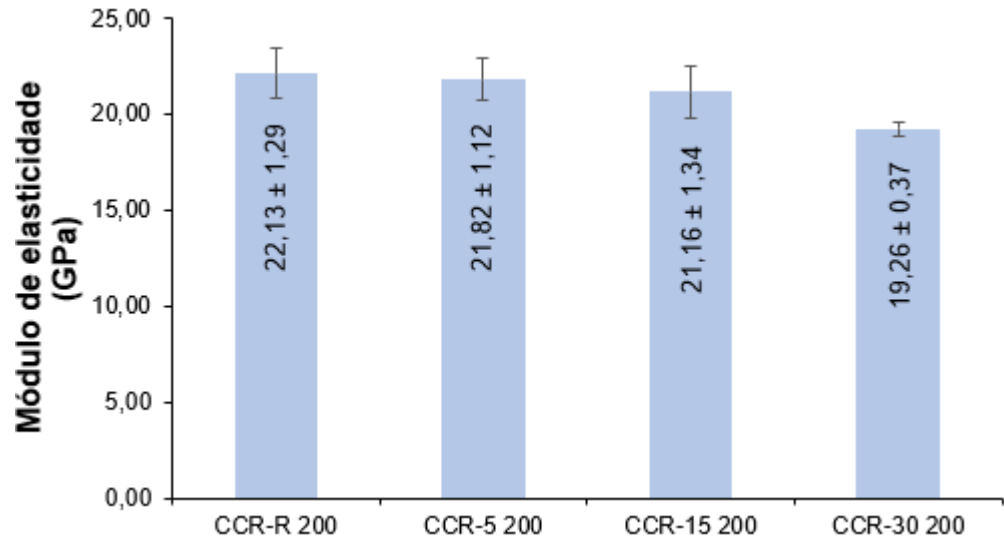


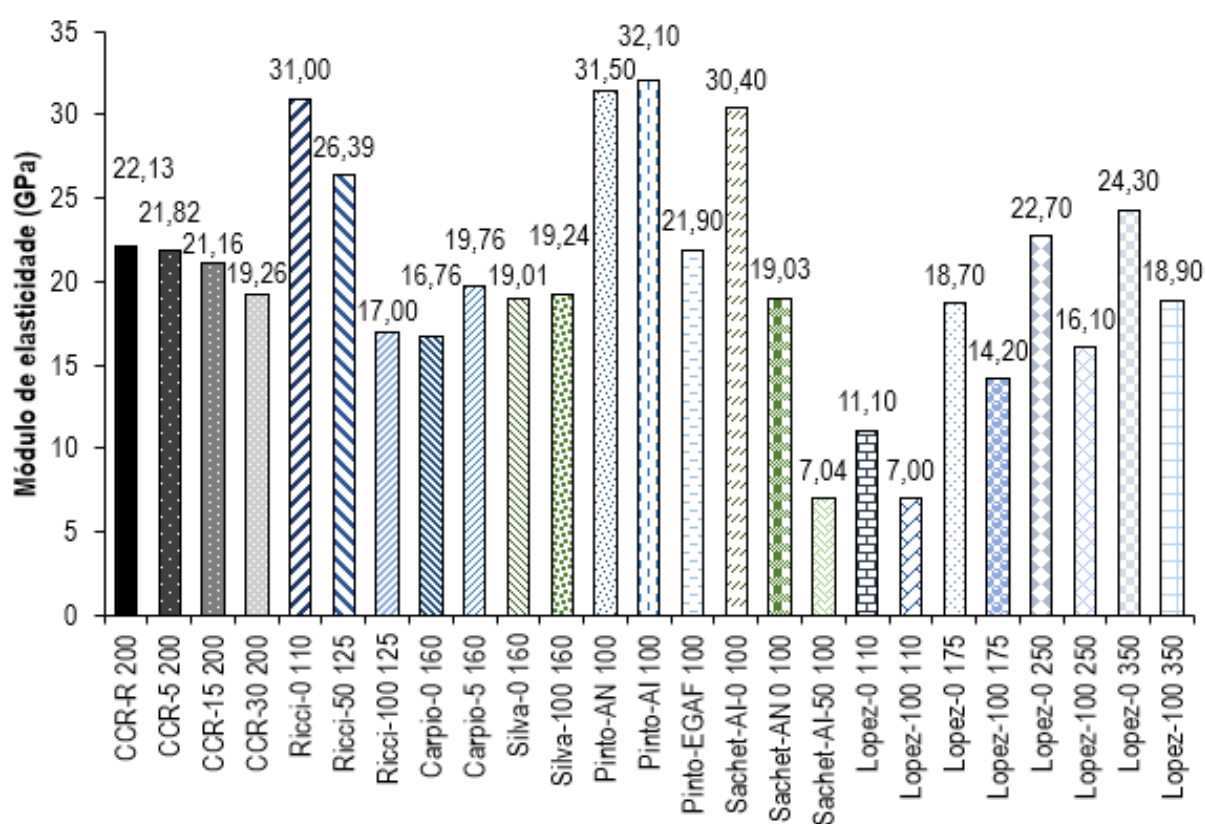
Tabela 24 - Resultados de Módulo de elasticidade aos 28 dias

Mistura	CCR-R 200	CCR-5 200	CCR-15 200	CCR-30 200
CP 1 (GPa)	21,29	21,94	22,08	19,41
CP 2 (GPa)	23,61	20,65	19,62	19,53
CP 3 (GPa)	21,48	22,88	21,78	18,84
Média (GPa)	22,13	21,82	21,16	19,26
Desvio padrão (GPa)	1,29	1,12	1,34	0,37

A Figura 41 mostra uma comparação de valores de E aferidos em diferentes pesquisas sobre CCR e materiais alternativos. Deve ser ressaltado que Pinto (2010) e Sachet (2012) determinaram os valores de E aos 35 dias e que Ricci (2007) realizou o ensaio por meio do teste de pulso de onda ultrassônica. Ainda assim, dentre os CCR

apresentados na Figura 41, a mistura de Pinto (2010) com areia industrial, proveniente da cominuição de rocha e consumo de cimento igual a 100 kg/m^3 , alcançou maior valor de E. Em contrapartida, a mistura de Sachet (2012) com areia industrial, 50% de substituição do agregado natural gráudo por RAP e consumo de cimento igual a 100 kg/m^3 , juntamente com o CCR de Lopez-Uceda *et al.* (2016) com 100% de ARC na fração gráuda de agregados e consumo de cimento igual a 110 kg/m^3 , apresentaram as médias mais baixas para E.

Figura 41 - Resultados de módulo de elasticidade para diferentes misturas de CCR



Relacionado aos valores, de E das misturas desta pesquisa, pode-se observar que as quatro médias ficaram bastante próximas entre si, com uma leve redução à medida em que se aumentava a porcentagem de ARC na mistura. Comparadas com as demais médias, as desta pesquisa encontram-se bastante próximas, numericamente da maioria dos valores de E aferidos por outros pesquisadores.

4.7 ANOVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CCR

A Tabela 26 sumariza o resultado de ANOVA para RCS das misturas de CCR com consumo de cimento igual a 120 kg/m³. Consecutivamente, a Tabela 27 traz os resultados de ANOVA para as propriedades mecânicas (RCS, RTD, RTF e E) das misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³.

Foi observado aos 7 dias que a RCS das misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³ não apresentou evidência estatística relativa à interferência do ARC nessa propriedade mecânica. Haja vista que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) é menor que o P valor ($P = 0,18464$), portanto, H_0 é aceita, inferindo que não há diferença entre as médias. Em contrapartida, para a RCS aos 28 dias, as misturas de CCR com 120 kg/m³ apresentaram significativa interferência do ARC na propriedade, ao nível de 95% de confiança ($\alpha = 0,05 \leq 0,00259 = p$). Assim, foi conduzido o teste de Tukey para identificar quais médias diferenciavam entre si. Quanto à RCS aos 28, observou-se, para um nível de significância de 5%, que há diferença de médias entre as misturas CCR-R 120 e a CCR-15 120, bem como entre CCR-15 120 e a CCR-30 120.

Tabela 25 - ANOVA para misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento

Propriedade	Tratamento	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F valor	P valor
RCS 7 dias	ARC	3	0,63850	0,21283	2,0365	0,18464
	Resíduos	8	0,83607	0,10451		
	Total	11	1,47457			
RCS 28 dias	ARC	3	4,8158	1,60526	11,839	0,00259
	Resíduos	8	1,0847	0,13559		
	Total	11	5,9005			

Em relação às propriedades mecânicas das misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³. Foi observado que RCS aos 28 dias e RTD aos 7 e 28 dias não apresentaram evidência estatística de diferença entre as médias, devido ao aumento de porcentagem de ARC no concreto.

A partir daí, depreendeu-se para RCS aos 7 dias, a rejeição de H_0 , a nível de significância de 5%. Ou seja, de acordo com a ANOVA, essa propriedade mecânica é

influenciada pela quantidade de ARC na mistura. Logo, ao aplicar o teste de Tukey, foi observado que as médias que diferem entre si são apenas as médias do CCR-5 200 e CCR-30 200. Por outro lado, a RCS aos 28 não é influenciada pelo aumento da porcentagem de ARC na mistura. Estatisticamente, isso pôde ser afirmado porque o nível de significância adotado era menor que o P valor ($\alpha = 0,05 \leq 0,0785 = p$) e H_0 foi adotada. Portanto, pôde ser afirmado que não há diferença entre as médias das misturas para essa propriedade mecânica.

Tabela 26 - ANOVA para misturas de CCR com 200 kg/m³ de cimento

Propriedade	Tratamento	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F valor	P valor
RCS 7 dias	ARC	3	12,242	4,081	5,545	0,0235
	Resíduos	8	5,888	0,736		
	Total	11	18,13			
RCS 28 dias	ARC	3	15,44	5,146	3,301	0,0785
	Resíduos	8	12,47	1,559		
	Total	11	27,91			
RTD 7 dias	ARC	3	0,2654	0,08845	1,109	0,401
	Resíduos	8	0,6379	0,07974		
	Total	11	0,9033			
RTD 28 dias	ARC	3	0,0681	0,02269	0,391	0,763
	Resíduos	8	0,4640	0,0580		
	Total	11	0,5321			
RTF 7 dias	ARC	3	0,4808	0,16027	24,89	0,000
	Resíduos	8	0,0368	0,00459		
	Total	11	0,5176			
RTF 28 dias	ARC	3	1,3727	0,4576	61,06	0,000
	Resíduos	8	0,0599	0,0075		
	Total	11	1,4326			
Módulo de elasticidade	ARC	3	14,892	4,964	4,104	0,0489
	Resíduos	8	9,676	1,209		
	Total	11	24,568			

Similar ao que se observou em RCS aos 28 dias, a RTD não apresentou diferenças entre as médias das misturas aos 7 e aos 28 dias. Assim sendo, compreende-se, que não há evidência estatística, a um nível de confiança de 95%, que essa propriedade mecânica do CCR não apresente interferências devido ao aumento da porcentagem desse tipo de resíduo na mistura.

Já em relação à RTF aos 7 e 28 dias, foi adotada H1, a um nível de significância de 5%. Logo, ($\alpha = 0,05 \geq 0,000 = p$), ou seja, há evidência estatística de que essa propriedade sofre interferências devido à presença de ARC na mistura. Aplicando o teste de Tukey no *software* R (R CORE TEAM, 2017) para identificar quais médias diferenciavam-se entre si, observou-se que para RTF aos 7 dias, somente as médias de CCR-5 200 e CCR-30 200 não são diferentes entre si, todas as restantes apresentavam diferenças. Similar diferenciação entre médias, foi observada para RCS aos 28 dias, onde todas as médias das misturas diferenciavam entre si, com exceção entre as médias de CCR-R 200 e CCR-15 200.

Por fim, para o módulo de elasticidade, também foi estatisticamente comprovado que essa propriedade tende a apresentar médias divergentes entre as misturas analisadas. Portanto, aceitando H1, a um nível de 5% de significância, foi observado, através da ANOVA que as misturas apresentavam diferentes médias de módulo de elasticidade devido à incorporação de ARC no CCR. Por conseguinte, o teste de Tukey evidenciou que a diferença entre médias para o módulo de elasticidade era perceptível tão-somente entre as médias das misturas CCR-R 200 e CCR-30 200.

Essas diferenciações entre as médias das propriedades mecânicas do CCR eram esperadas, pois em outras pesquisas acerca de CCR com materiais alternativos, já se observaram interferências, geralmente reduções nos valores de algumas propriedades mecânicas, decorrentes do aumento da porcentagem de materiais reciclados nas misturas (RICCI; BALBO, 2009; SACHET, 2012; LOPEZ-UCEDA *et al.*, 2016; BORRÉ, 2017). Se observada a Tabela 7, não há necessidade de uma ANOVA para identificar que o ARC tem efeito negativo nas propriedades mecânicas dos CCR analisados por Courard, Michel e Delhez (2010) e Lopez-Uceda *et al.* (2016).

4.8 RELAÇÕES LINEARES DAS PROPRIEDADES DAS MISTURAS

A Figura 42 (a) apresenta relações lineares entre a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima das misturas com 120 kg/m³ de cimento,

concomitantemente, a Figura 42 (b) apresenta a mesma relação para as misturas com 200 kg/m³ de cimento, sendo os sumários dessas relações, expostos na Tabela 27.

Percebe-se a partir da Figura 42 (a) que a relação entre umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima das misturas com 120 kg/m³ tem um mediano R² = 0,5506 enquanto para as misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ é muito bom, com R² = 0,9261 (Figura 42 (b)). Além disso, a relação apresentada na Figura 42 (a) apresenta o coeficiente angular não significativo, pois o P valor é superior ao nível de significância ($\alpha = 0,05 \leq 0,2579 = p$) (Tabela 27). Ambas relações evidenciam que a massa específica aparente seca máxima do CCR tende a diminuir conforme se aumenta a porcentagem de umidade ótima da mistura. Lopez-Uceda *et al.* (2016) observaram essa mesma tendência em suas misturas de CCR com substituição do agregado graúdo natural por ARC.

Figura 42 - Relações lineares entre umidade ótima e massa específica aparente seca máxima: (a) das misturas de 120 kg/m³ de cimento; (b) das misturas de 200 kg/m³ de cimento

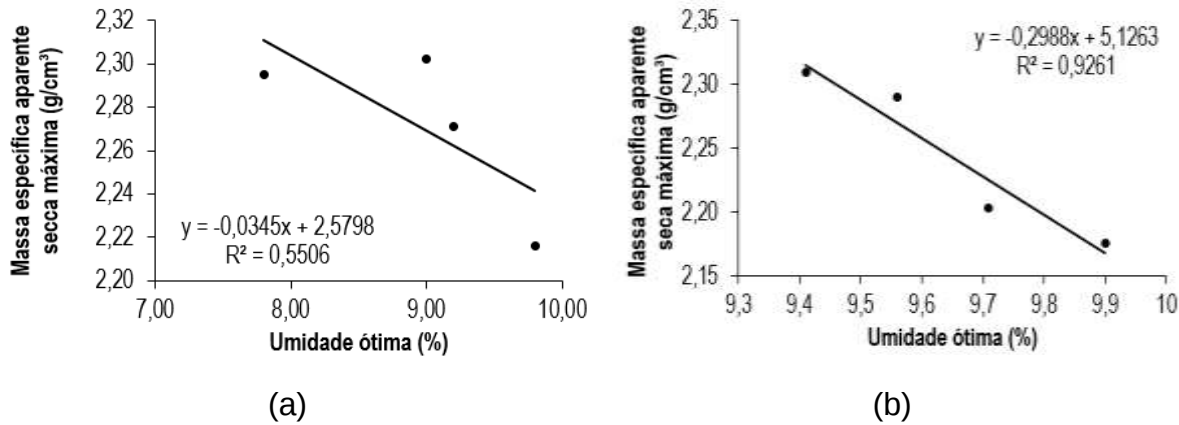
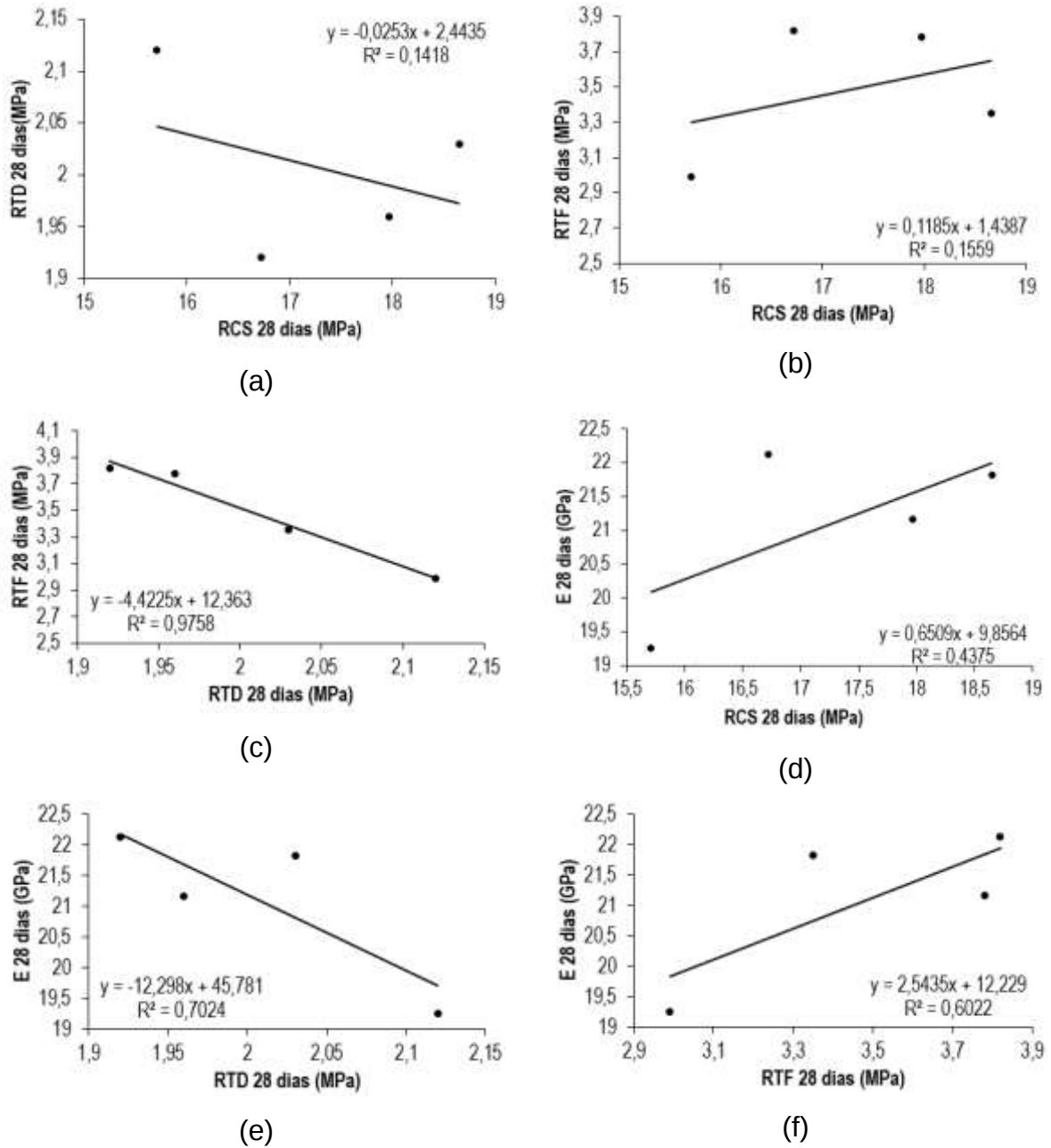


Tabela 27 - Sumário das relações lineares entre propriedades físicas dos CCR no estado fresco

Relação		Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (120 kg/m ³)		Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (200 kg/m ³)	
R ²		0,5506		0,9261	
R ² aj.		0,3259		0,8891	
Coeficientes		2,5798	-0,0345	5,1263	-0,2988
Erro padrão		0,1979	0,0220	0,5759	0,0597
Estatística t		13,0344	-1,5653	8,9012	-5,0046
P valor		0,0058	0,2579	0,0124	0,0377
Intervalos de confiança (95%)	inf.	1,7282	-0,2934	2,6484	-0,5557
	sup.	3,4314	0,0603	7,604	-0,4191

A Figura 43, por sua vez apresenta as relações lineares entre as propriedades mecânicas das misturas de CCR aos 28, com consumo de cimento igual a 200 kg/m³.

Figura 43 - Relações lineares entre as propriedades mecânicas dos CCR com 200 kg/m³ de cimento



A Figura 43 (a) evidencia uma fraca relação linear entre RCS e RTD ($R^2 = 0,1418$). Percebe-se que RTD tende a decair conforme aumenta RCS, sendo que o oposto foi observado por Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2013) ao estudarem CCR com alto volume de cinza volante, Borré (2017) e Lopez-Uceda *et al.* (2018). Além disso, foi observado que os valores de RTD das pesquisas de Mardani-Aghabaglou e

Ramyar (2013) e Lopez-Uceda *et al.* (2018) apresentavam cerca de 10% do valor de RCS, o que não foi observado nesta pesquisa. Além disso, o P valor para o coeficiente linear é de 0,0846 e o P valor para o coeficiente angular é de 0,62634 (Tabela 28), ambos são superiores ao nível de significância de 5%, o que confirma a baixa relação entre as variáveis do modelo porque ambos coeficientes não são estatisticamente significativos.

Quanto a relação entre RCS e RTF, plotada na Figura 43 (b), percebe-se também que ela é fraca entre essas propriedades ($R^2 = 0,1559$). Entretanto, pode ser observada uma relação positiva neste caso, indo de encontro à tendência positiva também observada por Lopez-Uceda *et al.* (2016) e Borré (2017) para mesmas propriedades. Denota-se então que há uma tendência da RTF do CCR resultar alta quando há um acréscimo no valor de RCS. A contraponto, o P valor de ambos coeficientes da equação também é alto nesta relação (Tabela 28). Isso indica que eles não são significativos para o modelo porque o P valor é maior que α .

Tabela 28 - Sumários das relações entre as propriedades mecânicas

Relação	R^2	R^2 aj.	Coeficientes	Erro padrão	Estatística t	P valor	Intervalos de confiança (95%)	
							Inf.	Sup.
RCS e RTD	0,1418	-0,2873	2,4435	0,7599	3,2152	0,0846	-0,8265	5,7135
			-0,02526	0,0439	-0,5749	0,6234	-0,2143	0,1638
RCS e RTF	0,1559	-0,2662	1,4387	3,3745	0,4263	0,7114	-13,080	15,9580
			0,1185	0,1951	0,6077	0,6052	-0,7208	0,9578
RTD e RTF	0,9758	0,9637	12,3632	0,9888	12,5033	0,0063	8,1088	16,6177
			-4,4225	0,4922	-8,9853	0,0122	-6,5403	-2,3048
RCS e E	0,4375	0,1562	9,8564	9,0287	1,0917	0,3889	-28,991	48,7036
			0,6509	0,5219	1,2472	0,3386	-1,5947	2,8964
RTD e E	0,7024	0,5536	45,781	11,3705	4,0263	0,0565	-3,1428	94,704
			-12,298	5,6599	-2,1728	0,1619	-36,651	12,0549
RTF e E	0,6022	0,4033	12,229	5,1182	2,3893	0,1395	-9,7931	34,2502
			2,5435	1,4617	1,7401	0,2239	-3,7457	8,8326

Uma forte relação linear ($R^2 = 0,9758$) pode ser evidenciada entre RTD e RTF (Figura 43 (c)). Similar relação linear foi observada por Lopez-Uceda *et al.* (2016), com $R^2 = 0,9466$ e por Hashemi *et al.* (2018) com $R^2 = 0,9117$, ao estudar CCR com teor de cimento de 9% e 12% e agregado naturais. Entretanto, a relação entre RTD e RTF

observada nesta pesquisa é contrária àquelas das pesquisas supracitadas. Nas pesquisas citadas, a relação é positiva, na Figura 43 (c), a relação é negativa. Contudo, tanto nesta pesquisa quanto em ambas citadas, o coeficiente de determinação foi superior a 0,9 e, dificilmente, se encontram relações lineares entre mesmas propriedades de pesquisas diferentes, ainda mais quando as três, nesse caso apresentam um excelente R^2 . Tal particularidade dessa relação pode ser devida à propriedade de resistência à tração do material, a qual estava sendo aferida sob duas metodologias de ensaio distintas: a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral. Observando o P valor dos coeficientes da regressão entre RTF e RTD, pode-se afirmar que ambos são inferiores a 0,05, indicando a significância estatística deles apara o modelo.

Outra fraca relação linear pose ser evidenciada entre RCS e E (Figura 43 (d)). Com $R^2 = 0,4375$ e P valores acima de 0,3 para ambos coeficientes. Nota-se que o modelo não é representativo dessa relação linear. Com um R^2 um pouco melhor que o obtido nesta pesquisa ($R^2 = 0,5465$), Lopez-Uceda *et al.* (2016) também observaram a mesma tendência entre RCS e E, onde o E tende a aumentar assim como aumenta RCS.

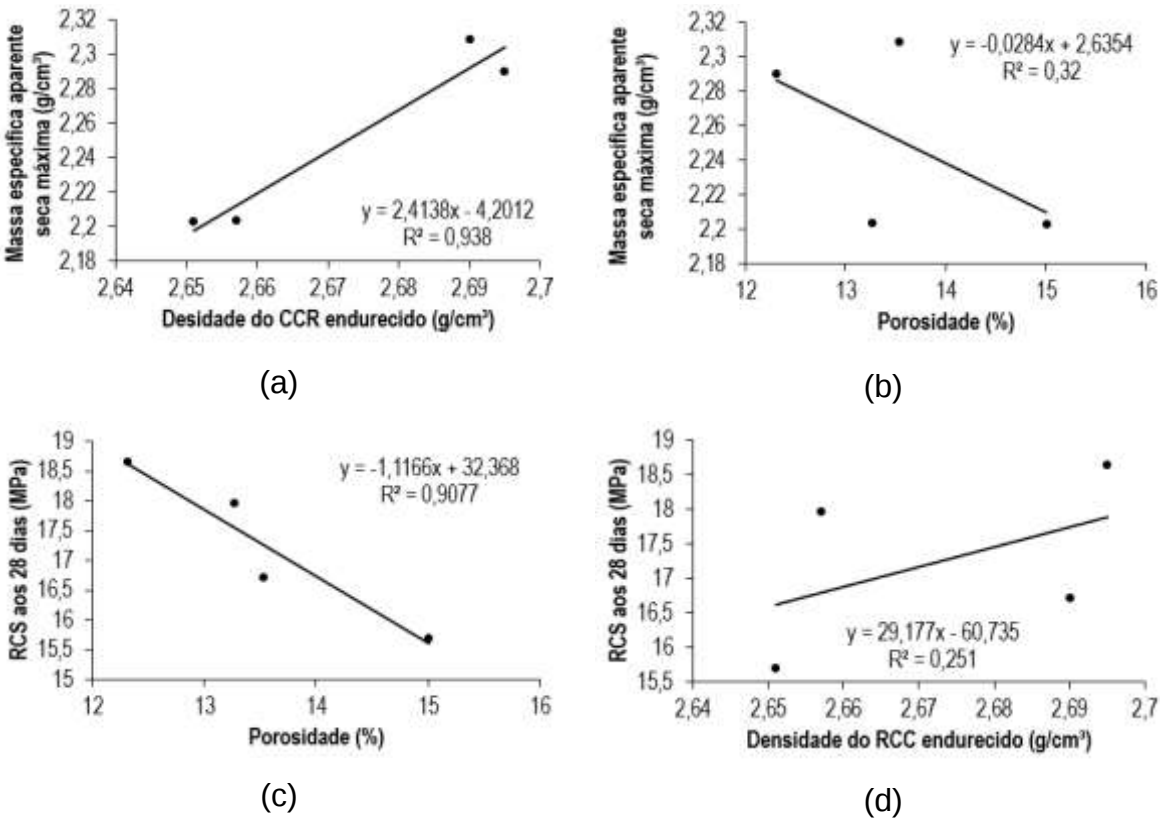
Na Figura 43 (e), nota-se uma razoável relação linear entre RTD e E ($R^2 = 0,7024$). Concomitantemente, a Figura 43 (f) apresenta outra aceitável relação linear entre RTF e E ($R^2 = 0,6022$). Comparando ambas relações, pode-se afirmar que o E tende a decair assim como aumenta RTD, mas o E também tende a crescer tal como RTF aumenta. Todavia, nenhum P valor dos coeficientes das relações entre RTD e E ou RTF e E é inferior ao nível de significância ($\alpha = 0,05$). Sendo assim, estatisticamente, pode ser afirmado que nenhum desses coeficientes contribui efetivamente para o ajuste do modelo e por isso, ambos modelos apresentam coeficientes de determinação baixos, embora aceitáveis.

Por fim, devem ser observadas as relações lineares plotadas na Figura 43 (a) e Figura 43 (e). Nota-se que entre RCS e RTD há uma relação negativa que também ocorre entre RTD e E. Além disso, a Figura 43 (b) apresenta uma relação positiva, bem como na Figura 43 (f), entre as propriedades RCS e RTF e entre RTF e E, respectivamente. Isso posto, pode-se compreender que a metodologia adotada para realização do ensaio de E, ao romper o CP na compressão, influiu também nos ajustes das regressões lineares entre as propriedades mecânicas do CCR. Não obstante, se

fosse realizado o rompimento do CP de CCR sob tração, talvez essas relações lineares seriam diferentes das então observadas.

A Figura 44 mostra relações lineares entre propriedades físicas do CCR e entre propriedades físicas do CCR endurecido e RCS. Apesar disso, a Tabela 29 apresenta os sumários dessas regressões lineares simples. Nela foram abreviados, por questão de espaço as seguintes propriedades físicas do CCR: Massa Específica Aparente Seca Máxima (MEASM), Porosidade (p) e Densidade (D).

Figura 44 - Relações lineares com propriedades físicas do CCR



Há uma excelente relação linear entre a massa específica aparente seca máxima e a densidade do CCR endurecido ($R^2 = 0,9380$), plotada na Figura 44 (a). Similar relação foi observada por Lopez-Uceda *et al.* (2016). Tal relação comprova o fato de que quanto maior o valor de massa específica aparente seca máxima no estado fresco do CCR, maior será o valor da densidade no estado endurecido e, conseqüentemente maior será a RCS aos 28 dias do concreto, considerando já a relação entre RCS e a densidade do CCR endurecido (Figura 44 (d)).

Tabela 29 - Sumários das relações lineares com propriedades físicas do CCR

Relação	R ²	R ² aj.	Coeficientes	Erro padrão	Estatística t	P valor	Intervalos de confiança (95%)	
							Inf.	Sup.
MEASM e D	0,9379	0,9069	-4,2012	1,1735	-3,5802	0,0699	-9,2502	0,8478
			2,4138	0,4389	5,4990	0,0315	0,5252	4,3025
MEASM e p	0,3200	-0,0199	2,6354	0,3967	6,6438	0,0219	0,9287	4,3421
			-0,0284	0,0293	-0,9702	0,4343	-0,1542	0,0975
RCS e p	0,9077	0,8615	32,368	3,4149	9,4784	0,0109	17,6749	470613
			-1,1166	0,2518	-4,4347	0,0473	-2,1999	-0,0332
RCS e D	0,2510	-0,1235	-60,735	95,2704	-0,6375	0,5890	-470,65	349,181
			29,177	35,6375	0,8187	0,4989	-124,16	182,513

Em relação à porosidade do CCR, a Figura 44 (b) evidencia que a massa específica aparente seca máxima tende a reduzir conforme aumenta a porosidade do concreto. O mesmo efeito pode ser observado na Figura 44 (c), na qual a RCS aos 28 dias tende a diminuir conforme aumenta o índice de vazios do CCR. Igual relação entre essas propriedades foi observada por Lopez-Uceda *et al.* (2016).

Por fim, deve-se ressaltar que essas relações lineares foram ajustadas com os resultados médios das propriedades de misturas diferentes. Por exemplo, para a relação linear entre RCS e RTD, foram plotadas as médias das propriedades das misturas CCR-R 200, CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30 200. Esse modo de ajuste, entre propriedades provenientes de misturas diferentes fez com que as relações lineares ficassem com baixos coeficientes de determinação e pouco significativas estatisticamente. Entretanto, foi decido manter os ajustes lineares dessa forma porque outros autores também o fizeram: Meddah, Beddar e Bali (2014), Lopez-Uceda *et al.* (2016) e Adamu *et al.* (2018).

4.9 AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DAS SEÇÕES DE PAVIMENTO

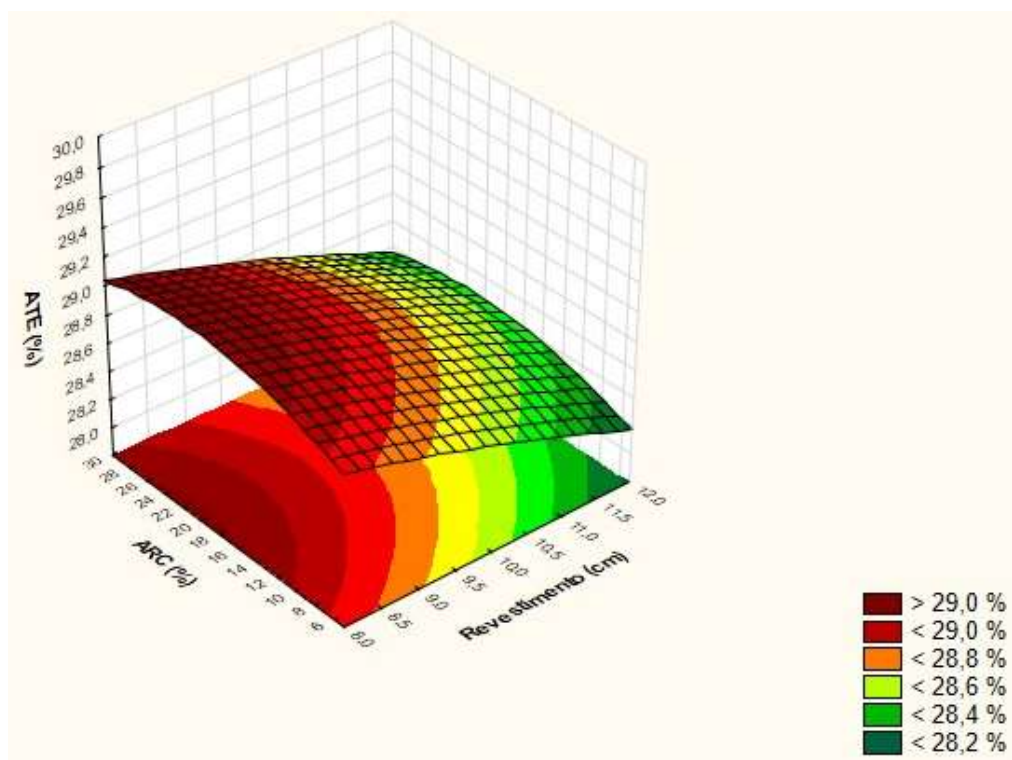
As seções de pavimentos dimensionadas no MeDiNa seguiram o modelo de seção da Figura 26. Obviamente, foi variado o material da base e mantidos inalterados os materiais constituintes das camadas de subleito e revestimento. Seguidamente à variação dos fatores (volume de tráfego no ano de abertura, espessura do

revestimento e material da base), foram estimados para composição da superfície de resposta: a ATE, o ATR e a espessura total da seção de pavimento dimensionado.

Como não foi realizado o ensaio de fadiga das misturas de CCR nesta pesquisa e os coeficientes de regressão do modelo de fadiga são dados necessários para adição de um novo material no MeDiNa, foi adotado o modelo da Equação 6, proposto por Trichês (1993) para misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³. Esse modelo também é sugerido pela Instrução de Projeto (IP) 07/2004 da PMSP (2004a). Além disso, foi adotado também o coeficiente de Poisson igual a 0,2, segundo Andriolo (1989), Balbo (2007) e Mehta e Monteiro (2014).

A partir disso, a Figura 45 apresenta a superfície de resposta, relativa à ATE, sendo o nível médio adotado do número N no ano de abertura da pista ($N = 3,3 \times 10^7$) como constante. Citando a Tabela 8, o nível de confiabilidade dos dimensionamentos no MeDiNa para o Sistema Arterial Principal é de 95% e como critérios limitantes de projeto, a porcentagem de área trincada estimada no fim do projeto não pode exceder 30%, bem como a deformação permanente não deve ser superior a 10 mm.

Figura 45 - Superfície de resposta para ATE, tendo constante $N=3,3 \times 10^7$

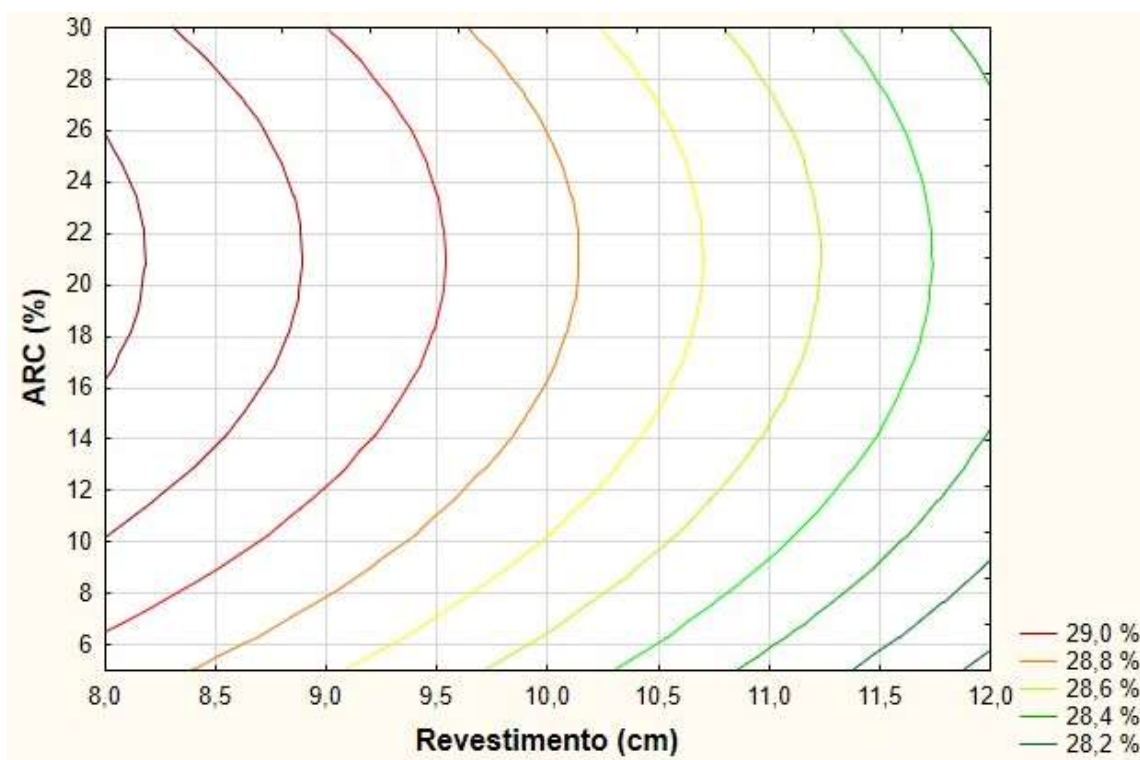


Depreende-se a partir da Figura 45 que nenhuma seção de pavimento dimensionada ultrapassou o limite de 30% para ATE no período de projeto. Disso,

compreende-se que quaisquer seções poderiam ser construídas, atendendo a tal critério de projeto. Entretanto, devido a considerações de fatores de segurança de projeto de engenharia, é mais coerente utilizar seções que apresentem o valor estimado para ATE não tão próximas do limite de 30%.

Para facilitar a visualização e escolha da seção, foi plotada a superfície de contorno com $N = 3,3 \times 10^7$ constante (Figura 46). Dessa figura, entende-se que a ATE é dependente tanto da porcentagem de ARC na base de CCR quanto da espessura do revestimento, mas em níveis diferentes. Em outras palavras, pode-se afirmar que quanto mais próxima do limite de projeto igual a 30%, a ATE é diretamente dependente da incorporação de ARC na mistura de base. Em contrapartida, quando a porcentagem de ATE está igual ou menor que 28%, ela torna-se diretamente dependente da espessura do revestimento, ignorando a influência da porcentagem do resíduo na base.

Figura 46 - Superfície de contorno para ATE com $N = 3,3 \times 10^7$ constante

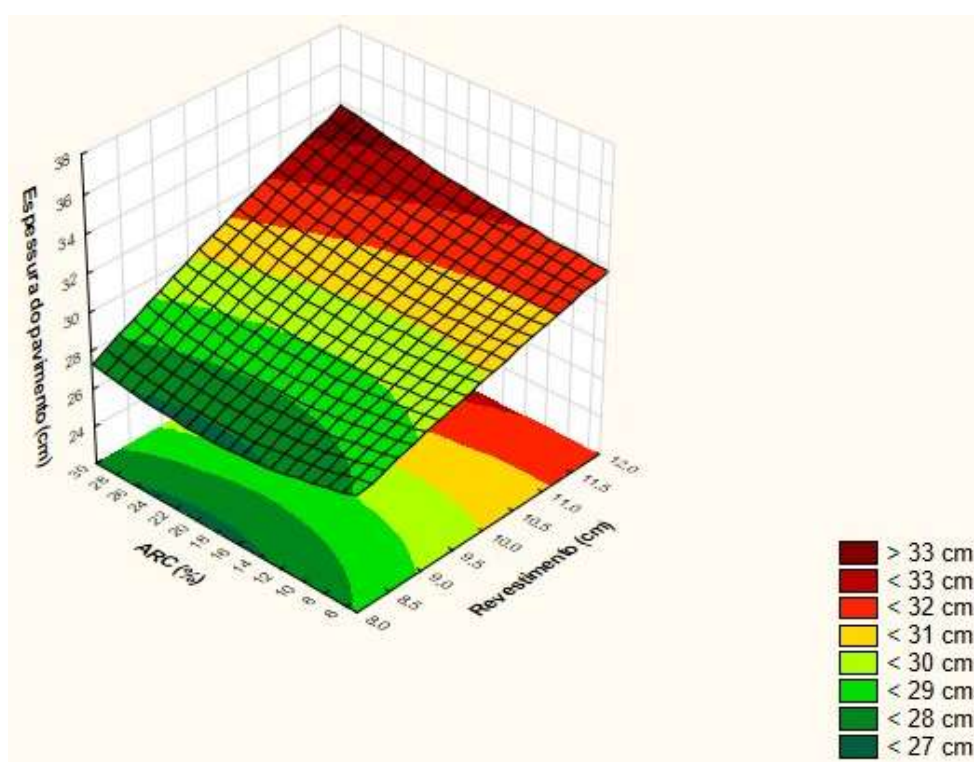


Ao se considerar o atendimento ao critério de ATE abaixo do nível de 30% e, concomitantemente atender à espessura mínima de revestimento igual a 10 cm (PMSP, 2004b; BALBO, 2007), pode-se empregar qualquer porcentagem de incorporação de ARC no CCR da base e espessura mínima do revestimento igual a

10 cm. Nessas condições, a porcentagem de área trincada ao fim do período de projeto seria igual a 28,5%. Outrossim, a Figura 46 também expõe que ao aumentar a espessura do revestimento e utilizar qualquer porcentagem de ARC na base, observa-se uma progressiva redução de ATE.

A Figura 47 apresenta a superfície de resposta para espessura da seção do pavimento dimensionado, com $N=3,3 \times 10^7$ constante. Nesse caso, não seria um entrave utilizar quaisquer espessuras plotadas na superfície de resposta, desde que a composição das camadas atenda aos esforços do tráfego. Contudo, ao admitir a executabilidade de uma seção menor em detrimento de uma mais robusta, em que ambas possam atender tecnicamente à demanda do tráfego, a seção delgada torna-se mais coerente por denotar redução do volume de materiais e, consequentemente, economia para obra.

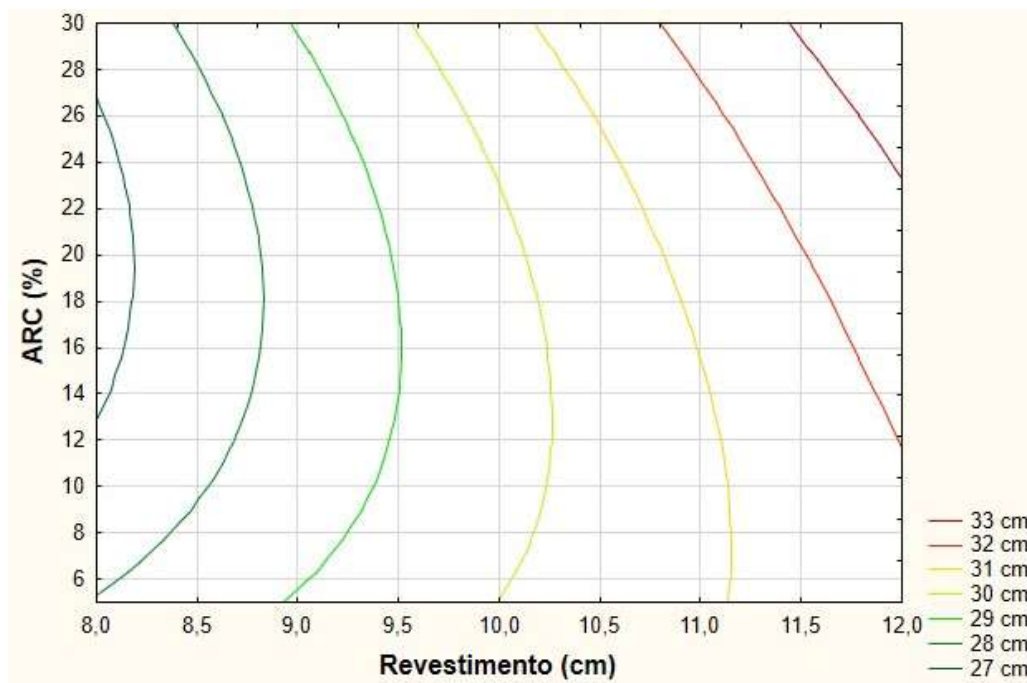
Figura 47 - Superfície de resposta para espessura da seção do pavimento com $N=3,3 \cdot 10^7$ constante



Assim, decidiu-se plotar o gráfico de superfície de contorno (Figura 48), com $N=3,3 \times 10^7$ mantido constante, para identificar qual possível espessura de seção de pavimento representaria economia à obra. A Figura 48 evidencia que a espessura da seção de pavimento está diretamente dependente da espessura do revestimento.

Além disso, a porcentagem de substituição de agregado natural por ARC na base de CCR não interfere nesse parâmetro.

Figura 48 - Superfície de contorno para espessura da seção do pavimento e $N = 3,3 \cdot 10^7$ constante



A Figura 49 apresenta a superfície de resposta para ATR, com o $N = 3,3 \cdot 10^7$, mantido constante. No caso do ATR, a deformação permanente não deve exceder 10 mm ao fim do período projeto.

Observa-se a partir da Figura 49 que nenhum valor extrapola o limite máximo de deformação permanente. Para facilitar a escolha da porcentagem de ARC a ser empregada na dosagem do material da base em CCR ou a escolha da espessura da camada de revestimento, foi utilizada a superfície de contorno, com a constante $N = 3,3 \cdot 10^7$, plotada da Figura 50.

O ATR é tão dependente da espessura da camada asfáltica quanto da porcentagem de ARC na mistura de CCR da base, consoante à Figura 50. Assim, para atender às condições de projeto, poderia ser utilizada uma espessura de revestimento de 10 cm e porcentagem de substituição do agregado natural graúdo por ARC na mistura de CCR para base, de 27% ou 28%.

Além disso, ao analisar as Figuras 49 e 50, pode-se concluir que quanto mais delgada for a espessura do revestimento maior será a probabilidade de se verificar dano acumulado próximo ao limite de 10 mm, nessa seção de pavimento. Sendo

assim, para ser evitado o acúmulo de danos no pavimento, deve ser considerado em projeto, o aumento da espessura do revestimento.

Figura 49 – Superfície de resposta para ATR, com $N = 3,3 \times 10^7$ constante

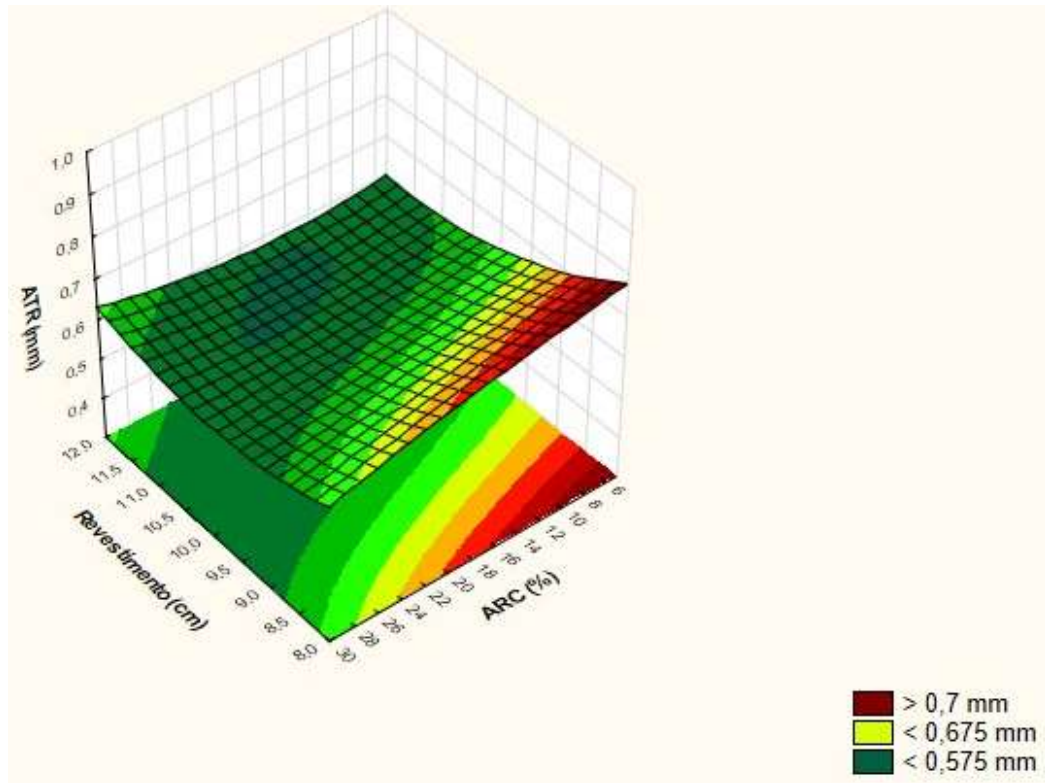
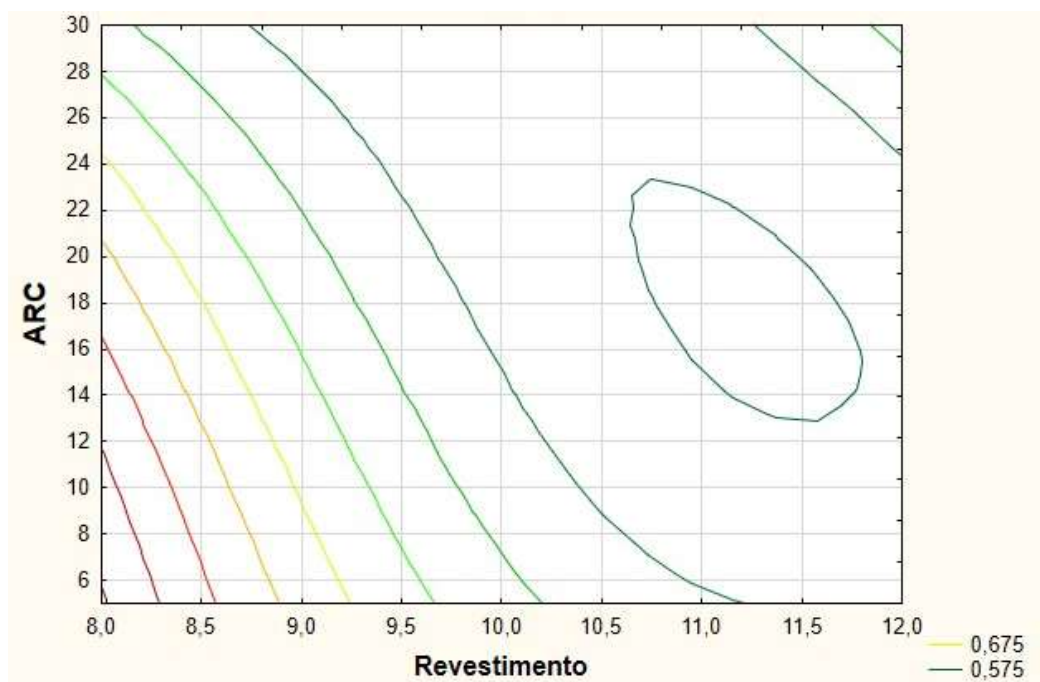


Figura 50 - Superfície de contorno para ATR, com $N = 3,3 \times 10^7$ constante



5 CONCLUSÕES

Levando-se em consideração os resultados dos ensaios de caracterização do ARC em comparação a outras pesquisas, acerca de agregados para CCR, pode-se identificar a potencial utilização desse resíduo como insumo para produção de CCR. Isso porque a distribuição granulométrica do agregado assemelha-se a outros agregados graúdos já empregados no CCR para pavimentação, bem como a dimensão máxima característica é igual a 19 mm, estando dentro dos limites recomendados por normas já citadas. Embora a absorção de água do ARC tenha apresentado um alto índice (7,63%), ele está aquém de valores de outras pesquisas já realizadas com outros tipos de agregados utilizados em pavimentação, como exemplos dos RCD utilizados por Ricci (2007) e Leite *et al.* (2011) que apresentaram absorção de água de 10,6% e 12,2%, respectivamente. Considerando ainda o resultado aferido na determinação da abrasão “Los Angeles”, mesmo ele apresentando um alto índice de desgaste (32%), ainda está abaixo dos resultados obtidos em outras pesquisas ou mesmo abaixo do limite recomendado pela literatura (40%), sugerindo assim, o potencial emprego deste resíduo como agregado para produção de CCR.

Considerando os resultados obtidos na etapa de dosagem das misturas. Pode-se perceber que todas as porcentagens de umidade ótima são elevadas em relação a algumas pesquisas anteriores, entretanto, não divergem muito quando comparadas entre si. Isso porque o CCR-R 120 apresentou umidade ótima igual a 7,8% e o CCR-30 120 igual a 9,8%, mistura a qual continha maior porcentagem de ARC, um agregado com grande absorção de água. Quanto às misturas com 200kg/m³ de cimento, a diferença entre as umidades ótimas foi menor (de 0,48% entre as misturas CCR-R 200 e CCR-30 200).

Em referência aos resultados de densidade seca máxima das misturas, não se observou variações em comparação a outras misturas de CCR de outros autores. Nesta pesquisa, as misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ apresentaram uma variação de massa específica aparente seca máxima entre 2,203 e 2,309 g/cm³. Em outras pesquisas, essa variação também foi próxima aos valores observados, a exemplo de Lopez-Uceda *et al.* (2016), que observaram uma variação entre 2,19 a 2,34 g/cm³ e Borré (2017) observou a variação da densidade entre 2,188 e 2,304 g/cm³.

Quanto à resistência à compressão das misturas de CCR, ficou evidente que há uma leve redução numérica dessa propriedade, quando se substitui o agregado graúdo por ARC, em massa. Com relação às misturas de CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³, observou-se que o CCR-5 200 apresentou maior média de RCS aos 28 dias, 18,65 MPa, em comparação às demais misturas. Inicialmente, poderia ser considerado que CCR com baixa porcentagem de substituição dos agregados graúdos naturais por ARC, poderia apresentar melhores resultados mecânicos, porém essa hipótese não pode ser confirmada através dos outros ensaios realizados.

Pela ANOVA, pode-se evidenciar que a interferência na propriedade mecânica devido à porcentagem de resíduo nas misturas com 120 kg/m³ de cimento é significativa apenas aos 28 dias, enquanto nas misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ esse teste estatístico foi significativo apenas para a idade de 7 dias. Isso ocorreu devido ao tipo de cimento empregado nas misturas. Para as misturas com consumo de cimento igual a 120 kg/m³ de CP II E 32 RS, o ganho de resistência entre as idades de 7 e 28 dias é mais perceptível que nas misturas com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ de CP V ARI RS, cujo tipo de aglomerante possui a principal característica de apresentar altas resistências em baixas idades. Assim, a variação de resistências observada aos 7 dias para os CCR com consumo de cimento igual a 200 kg/m³ é mais evidente nos estágios iniciais da cura do concreto que nas misturas que utilizaram o cimento composto.

Outrossim, as misturas com 120 kg/m³ de cimento não atenderam aos valores mínimos normatizados para aplicação em camadas de pavimentos. Nenhuma dessas misturas apresentou RCS $\geq 5,0$ MPa aos 7 dias (DNIT, 2013), requerendo assim, uma dosagem com consumo de cimento diferente. Por outro lado, as misturas com 200 kg/m³ de cimento atenderam aos valores mínimos requeridos por normas nacionais. Todas as misturas apresentaram RTF $\geq 1,5$ MPa aos 28 dias (PMSP, 2004a). Ainda se considerado os valores de referência de RCS, aos 7 dias, a mistura com menor média foi o CCR-30 200 com RCS = 13,01 MPa. Aos 28 dias, se considerado o valor recomendado pela PMSP, quando não se pode realizar o ensaio de RTF, todas as misturas apresentaram médias superiores a 15 MPa, sendo a menor delas igual a 15,71 MPa, atingida pelo CCR-30 200.

Quanto aos resultados de RTD, eles foram praticamente inconclusivos pois se esperava um decréscimo nos valores à medida em que se aumentava a porcentagem

de ARC à mistura ou ao menos um comportamento mecânico similar aos resultados de RTF. Além disso, em normas nacionais, não há um valor mínimo a ser atingido por essa propriedade mecânica. Contudo cabe ressaltar que aos 28 dias, a menor média foi observada na mistura de referência (1,92 MPa) e a maior resistência, observada na mistura CCR-30 200 (2,12 MPa). Como a ANOVA resultou que essa propriedade mecânica não é influenciada pela quantidade de ARC e que para RTF há uma interferência significativa. Concluiu-se que o ensaio de RTD retornou respostas incoerentes. Em contrapartida, se fosse adotado o mínimo valor de RTD = 1,6 MPa aos 28 dias, como recomenda a norma francesa (BOUSSETTA; KHAY; NEJI, 2018), todas as misturas de CCR com 200 kg/m³ de cimento atenderiam a esse requisito.

Ainda assim, quando comparados os resultados de RTD dos CCR desta pesquisa com os de Della Vecchia (2013) e Fedrigo, Rosa e Núñez (2014), observou-se que para um mesmo consumo de cimento (200 kg/m³), menor energia de compactação (intermediária), com a utilização de frações de ARC e sem adição de fibras de polipropileno, os resultados foram iguais ou até mesmo superiores. Sendo que nesse contexto comparativo, nenhuma mistura superou a média de RTD do CCR-R 200 aos 7 dias (2,02 MPa) ou mesmo a segunda maior média (1,86 MPa) referente à mistura CCR-15 200.

Quanto ao módulo de elasticidade, observou-se um leve decréscimo numérico à medida em que se adiciona o resíduo na mistura: 22,13 GPa, 21,82 GPa, 21,16 GPa e 19,26 GPa, respectivamente para as misturas CCR-R 200, CCR-5 200, CCR-15 200, CCR-30 200. Na ANOVA também foi confirmada essa suposição, ou seja, o módulo de elasticidade sofre significativo decréscimo proporcional ao aumento da porcentagem de ARC na mistura. Comparados a resultados de módulo de elasticidade de outros autores, os CCR desta pesquisa apresentaram médias de módulo de elasticidade bastante próximas a de outras pesquisas.

A partir das regressões lineares simples ajustadas, pode-se concluir que muitos dos modelos não foram significativos devido à variação das propriedades mecânicas. Um exemplo disso são as relações estabelecidas com RTD, as quais apresentaram coeficientes de determinação baixos devido aos resultados do experimento que não evidenciou o comportamento de redução da propriedade mecânica ante o aumento da porcentagem de ARC no CCR, como outras pesquisas já comprovaram. Poucos foram os modelos que retornaram um R² bom ou aceitável, caso da relação entre RTD e RTF (R² = 0,9758), por exemplo. Contudo, mesmo com modelos de relações lineares

pouco significativos, puderam ser observadas tendências de redução ou acréscimo de determinada propriedade em função de outra, similares a outras pesquisas, exemplo disso foi a relação entre RCS e E, que apresentou um R^2 baixo (0,4375), mas a mesma tendência positiva que a correlação de Lopez-Uceda *et al.* (2016).

Em relação aos dimensionamentos no MeDiNa, os materiais empregados na base de pavimentos (CCR-5 200, CCR-15 200 e CCR-30) podem ser utilizados como material para tal finalidade, haja vista que em nenhum momento a porcentagem estimada de área trincada ao fim do período (12 anos) foi superior ao limite de 30%, e a deformação permanente não ultrapassou o limite de 10 mm. Óbvio, considerando o dimensionamento para uma via do tipo sistema arterial principal, com 95% de confiabilidade e número de tráfego alto (variando entre 2.10^7 e 5.10^7). Ainda se evidenciou, segundo o método de dimensionamento, a desnecessidade em se aplicar uma camada de sub-base, sendo que todos os dimensionamentos foram realizados com um revestimento em concreto asfáltico com classe de fadiga 2, uma camada de base em CCR e um subleito siltoso. Mesmo assim, a camada cimentada ficou entre os limites de espessura do *software* (15 cm e 30 cm) e retornou resultados estimados para os danos na seção de pavimento, aceitáveis para a vida útil de projeto ($ATR \leq 10$ mm e $ATE \leq 30\%$).

A partir da MSR concluiu-se que a ATE da seção do pavimento tende a tornar-se dependente tanto da porcentagem de ARC no CCR da base quanto da espessura do revestimento, à medida em que se aumenta o volume de tráfego. Além disso, a MSR evidenciou que se poderia utilizar seções delgadas de pavimentos, entretanto não estaria atendendo às recomendações técnicas o que inicialmente poderia ser compreendido como algo econômico, poderia se tornar oneroso no porvir devido à refutação de recomendações técnicas.

Quanto ao ATR, evidenciou-se através dos dimensionamentos no MeDiNa e dos gráficos de superfície de resposta que aumentando a espessura do revestimento asfáltico, evita-se o acúmulo de danos permanentes na seção de pavimento. Outrossim, no gráfico de contorno ou mesmo na superfície de reposta para ATR com $N = 3,3 \times 10^7$, não se evidencia o acúmulo de danos na seção próximos ao limite (10 mm), isso é devido à utilização da camada da base cimentada, a qual aumenta a capacidade de suporte da seção do pavimento, bastante recomendada pela literatura (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; RITH; KIM; LEE, 2018).

Ante a essas ponderações, pode-se encorajar a utilização do ARC como agregado graúdo para emprego em CCR destinado à base de pavimentos, afinal ele tende a não apresentar significativas perdas das propriedades mecânicas do CCR e ainda assim, possibilitar o emprego do material na camada de pavimento dentro das recomendações do método mecanicista MeDiNa. Obviamente que, para cada novo projeto, deve-se realizar um estudo de traço para se averiguar se o agregado reciclado atende às normas rodoviárias vigentes e se o concreto produzido com esse insumo também atinge as resistências mínimas normatizadas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de futuras pesquisas acerca de CCR com utilização de ARC, sugere-se:

- a) Adotar diferentes consumos de cimento e diferentes energias de compactação para uma mesma mistura;
- b) Empregar outras porcentagens de substituição do agregado natural pelo ARC;
- c) Utilizar mais CP por idade de ensaio para aferir as propriedades mecânicas do material.
- d) Utilizar metodologia de dosagem diferente do método de compactação, utilizando o consistômetro VeBe, por exemplo;
- e) Buscar a redução da umidade necessária para moldagem de CP, trabalhando por exemplo, com umidades aquém da umidade ótima;
- f) Realizar a análise da microestrutura de misturas de CCR com ARC.

REFERÊNCIAS

ABREU, José Vanderlei. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/acervos/buscaautor/codigoAutor/503>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

ADAMU, Musa; MOHAMMED, Bashar S.; SHAFIQ, Nasir; LIEW, Mohd Shahir. Durability performance of high volume fly ash roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. **International Journal of Pavement Engineering**. [S.l.]. Nov., 2018. p. 1-8. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2018.1547825>>. Acesso em 19 out. 2019.

ANDRADE, Walton Pacelli de (Ed.). **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: PINI, 1997.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado**. Rio de Janeiro: PINI, 1989. 303 p.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues; SGARBOZA, Bento Carlos. Concreto Compactado a Rolo Vibratório – CCR. In: _____. **Inspeção e qualidade do concreto**. São Paulo: NEWSWORK, 1993. p. 479-483.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA DE RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2017. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 02 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 26**. Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016b.

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

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

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

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

_____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 16312-1:** Concreto compactado com rolo – Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO – ABRECON. **Relatório pesquisa setorial 2014/2015:** A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. São Paulo: ABRECON, 2015. Disponível em: <http://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em: 02 out. 2018.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; ALI, M. M. Y.; BO, M. W. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. **Geotechnical Testing Journal**. [S.l.]. Set., 2012. v. 35. p. 743-751. Disponível em: <<https://compass-astm.ez74.periodicos.capes.gov.br/download/GTJ103402.11861.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

ARULRAJAH, Arul; DISFANI, Mahdi M.; HORPIBULSUK, Suksun; SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdsak; PRONGMANEE, Nutthachai. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement bases/subbase applications. **Construction and Buildings Materials**. [S.l.]. Maio, 2014. v. 58. p. 245-257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814001809?via%3Dihub>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica:** materiais projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

_____. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p.

BALBO, José Tadeu; Dornelas, Ricardo Cruvinel. Custos de reciclagem de pavimentos de concreto e seu potencial econômico na realidade brasileira. **Revista Transportes**. [S.l.]. 2015. v. 23. n. 2. p.75-84. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/transportes.v23i2.846>>. Acesso em 19 jan. 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 f.

BORRÉ, Gracieli. **Estudo de resistência mecânica do concreto compactado com rolo com emprego de material fresado asfáltico para base de pavimentos**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14246/DIS_PPGECC_2017_BORRE_G_RACIELI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 nov. 2018.

BOUSSETTA, Ines; KHAY, Saloua El Euch; NEJI, Jamel. Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**. [S.l.]. Jun., 2018. p. 1-15. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1482792>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A. **Estatística básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540 p.

BUTTLER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06082003-172935/pt-br.php>>. Acesso em: 01 maio 2018.

CARPIO, Joe Arnaldo Villena del. **Estudo da influência da adição da cinza da casca de arroz nas propriedades do CCR (Concreto Compactado com Rolo) para seu uso em pavimentos compostos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93235>>. Acesso em: 09 ago. 2019.

CERVO, Tatiana Cureau. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. 2004. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/tatianacervo.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

CHHORN, Chamroeun; HONG, Seong Jae; LEE, Seung-Woo. A study on performance of roller-compacted concrete for pavement. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Out., 2017. v. 153. p. 535-543. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817314782?via%3Dihub>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

_____. Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. [S.l.]. Maio, 2018. v. 5. p. 215-223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756417301253?via%3Dihub>>. Acesso em 18 nov. 2018.

CHHORN, Chamroeun; LEE, Seung-Woo. Consistency control of rolled-compacted concrete for pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**. [S.l.]. Jul., 2017. v. 21. p. 1757-1763. Disponível em: <<https://link.springer.com.ez74.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12205-016-0820-y>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

_____. Influencing compressive strength of roller-compacted concrete. **Construction Materials**. 2018. [S.l.]. Fev., 2018. v. 171. p. 3-10. Disponível em: <<https://www.icvirtuallibrary.com/doi/10.1680/jcoma.16.00009>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

CHO, Yoon-Ho; YEO, Sung-Hun. Application of recycled waste aggregate to lean concrete subbase in highway pavement. **Canadian Journal of Civil Engineering**. [S.l.]. Dez., 2004. v. 31. p. 1101-1107. Disponível em: <<http://web.b-ebshost.com.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=495fef8a-85a0-420a-a621-e17138675e58%40sessionmgr103>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**: Relatório gerencial. Brasília: CNT, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 136, de 17 jul. de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

COURARD, Luc; MICHEL, Frédéric; DELHEZ, Pascal. Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Mar., 2010. v. 24. p. 390-395. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180900244X?via%3Dihub>>. Acesso em 30 nov. 2018.

DEBIEB, Farid; COURARD, Luc; KENAI, Said; DEGEIMBRE, Robert. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jul., 2009. v. 23. p. 3382-3387. Disponível em: <<https://www-sciencedirect-com.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061809002116?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **EM 034:** água para argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997b.

_____. **ME 035:** Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

_____. **ME 194:** Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998b.

_____. **ME 195:** Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de estudos de tráfego.** Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **Software MeDiNa:** Método de dimensionamento nacional de pavimentos. Versão 1.1.3.0 de set. de 2019. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/solicitacao-de-download-do-medina>>.

_____. **Norma DNIT 056/2013.** Pavimento rígido – Sub-base de cimento de concreto Portland compactada com rolo – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Norma DNIT 059/2004 – ES.** Pavimento rígido – Pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2004.

EFFTING, Carmeane. **Mecânica da fratura aplicada aos materiais dúcteis e frágeis.** 2004. 247 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2004.

FEDRIGO, Willian; ROSA, Francisco Dalla; NÚÑEZ, Washington Peres. Dosagem de concreto compactado com rolo visando sua aplicação em bases e sub-bases de pavimentos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, 17., 2014, Goiânia. **Anais...**Goiânia: COBRAMSEG, 2014. Não paginado. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/anais-cobramsegsbmrgeojovem/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** 2007. 315 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&o_obra=82285>. Acesso em: 20 mai. 2018.

FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goreti da. **Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico – Apresentação dos programas**

desenvolvidos. Rio de Janeiro: UFRJ; DNIT, 2018. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manual-de-utilizacao-medina.pdf/view>>. Acesso em: 12 jan. 2020.

FRITZEN, Marcos Antonio; FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença; NASCIMENTO, Luis Alberto Hermann; MOTTA, Laura Maria Goreti da; UBALDO, Mariluce Oliveira. Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga. In: Congresso Rodoviário Português, 9., 2019, Lisboa. **Anais...** Lisboa: CRP, 2019. Disponível em: <http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP_Artigo_33.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2020.

GABR, A. R.; MILLS, K. G.; CAMERON, D. A. Repeated Load Triaxial Testing of Recycled Concrete Aggregate for Pavement Base Construction. **Geotechnical and Geological Engineering**. [S.l.]. Fev., 2013. v. 31. p. 119-132. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-012-9572-8>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

GRAÇA, N. G.; MENDES, H. S.; BITTENCOURT, Rubens, M.; BITTENCOURT, Reynaldo M.; BORGES, V. E. S.; CASCUDO, Oswaldo. Influência do Grau de Compactação nas Propriedades do Concreto Compactado com Rolo. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 3., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CITENEL, 2005. Disponível em: <http://engipapers.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=242:00125cocc2005&catid=81&Itemid=499>. Acesso em: 11 abr. 2018.

HARRINGTON, Dale; ABDO, Fares; ADASKA, Wayne; HAZAREE, Chetan V.; CEYLAN, Halil. **Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements**. Ames: Iowa State University, 2010. Disponível em: <https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102/>. Acesso em: 10 nov. 2018.

HASHEMI, Mohammad; SHAFIGH, Payam; KARIM, Mohamed Rehan Bin; ATIS, Cengiz Duran. The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Abr., 2018. v. 169. p. 553-566. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

HASPARYK, Nicole Pagan; FARIAS, Luciana dos Anjos; MUNIZ, Francesca Chein; ANDRADE, Moacir Alexandre Souza de; TEIXEIRA, Márcia Peres; ANDRADE, Walton Pacelli de. Concreto Compactado com Rolo (CCR) – Um estudo da durabilidade e microestrutura na presença de adições. In: Simpósio EPUSP sobre Estrutura de Concreto, 5., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 2003. Disponível em: <http://engipapers.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=733:00610cocc2003&catid=81:compactado-com-rolo&Itemid=499>. Acesso em: 10 nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Projeção de população do Brasil e das Unidades da Federação. **IBGE**, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

KLEINERT, Thaís Radünz; NÚÑEZ, Whashington Peres; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. Estudo laboratorial de misturas típicas de reciclagem de pavimentos

semirrígidos com adição cimento visando a proposição de um método de dosagem. In: Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, XXIX., 2015, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANPET, 2015. Disponível em: <http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/RT805.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2019.

KUMAR, Rakesh. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Mar., 2017. v. 142. p. 248-255. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S095006181730449X?via%3Dihub>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

LAM, My Ngoc-Tra; JARITNGAM, Saravut; LE, Duc-Hien. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Nov. 2017. v. 154. p. 482-495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-09012008-162141/pt-br.php>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

LEITE, Fabiana da Conceição; MOTTA, Rosângela dos Santos; VASCONCELOS, Kamila L.; BERNUCCI, Liedi. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jan., 2011. v. 25. p.2972-2979. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810006367>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

LESSARD, Jean-Martin; OMRAN, Ahmed Fathy; TAGNIT-HAMOU, A.; GAGNÉ, R. Production of RCC Using Biomass Fly and Bottom Ashes: From Laboratory to Fieldwork. **Journal of Materials in Civil Engineering**. [S.l.]. Nov., 2017. v. 29. n. 11. p. 1-13. Disponível em:<[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002074](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002074)>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LOPEZ-UCEDA, Antonio; AGRELA, Francisco; CABRERA, Manuel; AYUSO, Jesús; LÓPEZ, Martín. Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. **Road Materials and Pavement Design**. [S.l.]. Set., 2016. v.19. p. 36-55. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2016.1232659>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

LOPEZ-UCEDA, Antonio; AYUSO, Jesús; JIMÉNEZ, José Ramón; GALVÍN, Adela P.; REY, Isaac Del. Feasibility study of roller comapcted concrete with recycled aggregates as base layer for light-traffic roads. **Road Materials and Pavement Design**. [S.l.]. Jun., 2018. v.21 n. 1. p.276-288. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2018.1483257>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MARDANI-AGHABAGLOU, Ali; RAMYAR, Kambiz. Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum dry density method. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jan., 2013. v. 38. p. 356-364. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.109>>. Acesso em: 30 set. 2019.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação do projeto rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/103728>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

MEDDAH, Abdelaziz; BEDDAR, Miloud; BALI, Abderrahim. Use of shredded tire aggregates for roller compacted concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**. [S.l.]. Mar., 2014. v. 72. p. 187-192. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: INTERCIÊNCIA, 2015. 638 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo, J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MODARRES, Amir; HOSSEINI, Zeinab. Mechanical properties of roller compacted containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. **Materials & Design**. [S.l.]. Dez., 2014. v. 64. p. 227-236. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914006049?via>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

MOHAMMED, Bashar S.; ADAMU, Musa. Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jan., 2018. v. 159. p. 234-251. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 629 p.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de confiabilidade de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/753-laura-maria-goretti-da-motta>>. Acesso em 13 dez. 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NOROOZI, Reza; SHAFABAKHSH, Gholamali; KHEYRODDIN, Ali; MOGHADDAM, Abolfazl Mohammadzadeh. Investigating the effects of recycled PET particles, shredded recycled steel fibers and Metakaolin powder on the properties of RCCP. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Nov., 2019. v. 224. p. 173-187. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.012>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

PINTO, Paulo César. **Investigação de parâmetros do CCR com incorporação de escória granulada de alto forno para utilização como base de pavimentos**. 2010. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-11082010-122445/pt-br.php>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/GestResiduosSolidos.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2019.

PITTA, Márcio Rocha. **Estado-del-arte de los pavimentos de concreto compactado com rodillo**. Asociación de Productores de Cemento – ASOCEM, 1994.

PITTMAN, David W.; RAGAN, Steven A. Drying shrinkage of roller-compacted for pavement applications. **ACI Materials Journal**. [S.l.]. Jan. 1998. v. 95. n. 1. p. 19-26. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/i/348>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. **IP – 05/2004**: Dimensionamento de pavimentos flexíveis: tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus. São Paulo, 2004b.

_____. **IP – 07/2004**: Dimensionamento de pavimentos de concreto. São Paulo, 2004a.

QUADROS, Marina Guzzon de. **Dimensionamento de pavimentos asfálticos com o método mecanístico-empírico**: uso do novo método de dimensionamento nacional. 2018. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

R CORE TEAM. **A language and environmental for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RAO, M. Chakradhara; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures**. [S.l.]. Jan., 2011. v. 44. p. 205-220. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-010-9620-x>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

RAO, Meijuan; YANG, Huaquan; LIN, Yuqiang; LI, Jiazheng; SHI, Yan. Influence of maximum aggregate sizes on the performance of RCC. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Abr., 2016. v. 115. p. 42-47. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816304755>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

RIBEIRO, A. C. Bittencourt; ALMEIDA, I. R. de. Study on high performance roller compacted concrete. **Materials and Structures**. [S.l.]. Jul., 2000. v. 33. p. 398-402. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02479649>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

RIBEIRO, Adriano Mendes. **Estudo da incorporação de altos teores de argila calcinada no concreto compactado com rolo**. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/652>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

RICCI, Gino. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e demolição para pavimentação**. 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-09012008-162125/pt-br.php>>. Acesso em 22 mar. 2018.

RICCI, Gino; BALBO, José Tadeu. Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e de demolição para aplicações em pavimentação. **Transportes**. [S.l.]. Dez., 2009. v. XVII, n. 2. p. 27-35. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/357>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

RITH, Makara; KIM, Young Kyu; LEE, Seung Woo. Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jun., 2018. v. 175. p. 144-151. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.194>>. Acesso em: 16 maio 2020.

SACHET, Taís. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. 2012. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-18062013-153946/pt-br.php>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

SADATI, Seyedhamed; KHAYAT, Kamal H. Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Set., 2016. v. 126. p. 691-700. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816315288?via%3Dihub>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008.

SHAMSAEI, Mohsen; AGHAYAN, Iman; KAZEMI, Kani Akhavan. Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**. [S.l.]. Nov., 2017. v. 165. p. 290-297. Disponível em: <[https://www.sciencedirect-com.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652617315524?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652617315524?via%3Dihub)>. Acesso em: 23 abr. 2018.

SILVA, Alexandre José da. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos**. 2006.180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89471>>. Acesso em 22 mar. 2018.

TIBCO, Software Inc. **Statistica**: Ultimate Academic Bundle. Version 13.0. 2020. Disponível em: < <http://statistica.io>>.

TOFFOLO, Rodrigo Vicente Machado. **Pavimentos sustentáveis**. 2015, 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/dissertacao-de-mestrado-rodrigo-vicente-machado-toffolo.pdf>. Acesso em 03 abr. 2018.

TRICHÊS, Glicério. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento à fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. 1993. 378 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1993. Disponível em: <<http://www.bdlita.bibl.ita.br/tesesdigitais/000298128.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2018.

VALENCIA, Luz Elena Santaella. Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo (CCR). **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**. Bogotá. Nov., 1999. v. 8. p. 9-23. Disponível em: <<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1403>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O concreto no Brasil**: pré-fabricação, monumentos, fundações. São Paulo: Studio Nobel, 2002.