

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Gracieli Borré

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO
COMPACTADO COM ROLO COM EMPREGO DE MATERIAL
FRESADO ASFÁLTICO PARA BASE DE PAVIMENTOS**

Santa Maria, RS, Brasil
2017

Gracieli Borré

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COMPACTADO COM
ROLO COM EMPREGO DE MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO PARA BASE DE
PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof^a. Dra. Tatiana Cureau Cervo

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Borré, Gracieli

Estudo de resistência mecânica do concreto compactado com rolo com emprego de material fresado asfáltico para base de pavimentos / Gracieli Borré.- 2017.

118 f.; 30 cm

Orientadora: Tatiana Cureau Cervo

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

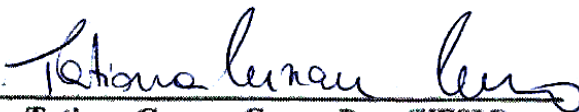
1. Concreto compactado com rolo 2. Base de pavimentos
3. Fresado asfáltico 4. Resistências mecânicas I. Cervo,
Tatiana Cureau II. Título.

Gracieli Borré

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COMPACTADO COM
ROLO COM EMPREGO DE MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO PARA BASE DE
PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 25 de agosto de 2017:



Tatiana Cureau Cervo, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Ângela Azevedo de Azevedo, Dra. (UFPel)
(Defesa por vídeo conferência)



Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017.

DEDICATÓRIA

Ao meu namorado André Zwirtes, por todo amor, carinho, incentivo e compreensão. Dedico também a meus pais Sirlei e Nelson, pelo amor dedicado e apoio em minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo e de uma maneira especial, agradeço:

À minha orientadora Tatiana Cureau Cervo pela oportunidade, por toda paciência e dedicação em orientar, e repassar seus conhecimentos.

À minha família, em especial meus pais Sirlei e Nelson, por terem me dado amor, carinho, compreensão, motivação e suporte, em todas as minhas escolhas.

Ao meu namorado e amigo André Zwirtes, por toda paciência, incentivo e motivação. Todo amor e carinho dado para me acalmar nos momentos difíceis. Muito obrigada.

Aos professores Deividi da Silva Pereira e Ângela Azevedo de Azevedo pela disponibilidade em serem minha banca examinadora e compartilhar seus conhecimentos.

Sou agradecida ao Rodrigo Puhl, por ter me acompanhado e ajudado em todas as etapas desta pesquisa.

Igualmente agradeço aos colegas e amigos Kátia, Priscylla, Bruno e Gabriela por terem acompanhado e estado presentes em todos os momentos do mestrado, desde os trabalhos em aulas, até suas respectivas pesquisas. Obrigada pelo apoio e incentivo.

A todos os integrantes do grupo GEPPASV que de alguma forma ajudaram na realização da pesquisa.

Agradeço a todos os professores da pós-graduação, que repassaram seus conhecimentos e experiências com dedicação e seriedade.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigada.

RESUMO

ESTUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO COM EMPREGO DE MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO PARA BASE DE PAVIMENTOS

AUTORA: Gracieli Borré

ORIENTADORA: Tatiana Cureau Cervo

O crescimento do volume de tráfego e a aparição de veículos mais pesados estão originando uma maior degradação e maiores deformações na malha rodoviária brasileira, conseqüentemente elevando os custos de manutenção, forçando os gestores e pesquisadores a encontrar sempre novas alternativas para melhorar o aproveitamento dos materiais, diminuir o consumo de energia utilizado nas execuções, agilizar as intervenções de restauração, entre outros. Outro fator importante que se destaca é a questão ambiental, onde é diretamente afetada nas construções e manutenções de rodovias, seja no consumo de materiais naturais, nas movimentações de terras, nos combustíveis utilizados, etc. O Concreto Compactado com Rolo (CCR) aparece como um material que se enquadra dentro desta perspectiva, pois, em alguns casos, tem como proposta reduzir o consumo de cimento e o tempo de execução, e ainda tem uma alta vida útil sem a necessidade de manutenção, assim sendo técnica e economicamente atrativo. Outro ponto a seu favor é o fato de serem utilizados os mesmos equipamentos que a pavimentação asfáltica. Ainda, o CCR, depois de endurecido, para um dado consumo de cimento pode apresentar características similares ou superiores aos concretos convencionais vibrados. Uma das características do concreto em geral, está no fato de ele permitir na sua composição a incorporação de outros materiais, como o material fresado asfáltico. Tem-se assim um impacto positivo na economia da construção com concreto. O objetivo deste trabalho foi analisar três resistências mecânicas do concreto compactado com rolo (CCR), com substituição parcial do agregado graúdo por fresado (RAP), nas porcentagens de 10 e 30% para uso em base de pavimentos, com diferentes consumos de cimento em idades de cura distintas. As misturas ensaiadas foram dosadas com 100 e 150 kg de cimento por metro cúbico, valores estes típicos para CCR empregados em camadas de base de pavimentos, totalizando em seis misturas pesquisadas. As propriedades estudadas foram a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão, aos 7 e 28 dias de cura. Foram analisados os efeitos da porcentagem de fresado, do consumo de cimento e do tempo de cura, compactando-se os corpos de prova na energia intermediária. Os principais resultados apontaram que o desempenho das misturas de CCR com 10% de fresado é superior às convencionais. Porém existe uma queda nas resistências quando a quantidade de fresado sobe para 30%. As RCS das misturas variaram de 5,74 a 11,42 MPa aos 7 dias e de 6,17 a 16,27 MPa aos 28 dias de cura. Já as RTCD variaram de 0,56 a 1,73 Mpa nos 7 dias e 0,77 a 2,27 Mpa nos 28 dias. O ensaio de RTF obteve valores variando de 0,55 a 1,6 MPa aos 7 dias de cura e 0,87 a 1,96 MPa aos 28 dias de cura. É notável a grande influência do tempo de cura nas resistências. Quanto ao consumo de cimento, é possível afirmar que existe uma expressiva melhora nas resistências quando é utilizado um maior consumo de cimento.

Palavras-chave: Concreto compactado com rolo. Base de pavimentos. Fresado asfáltico. Resistências mecânicas.

ABSTRACT

STUDY OF MECHANICAL STRENGTH OF ROLLER COMPACTED CONCRETE WITH EMPLOYMENT OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT MATERIAL FOR BASE PAVEMENT

AUTHOR: Gracieli Borré

ADVISOR: Tatiana Cureau Cervo

The increase in traffic volume and the appearance of heavier vehicles are causing a greater degradation and deformation in the Brazilian road network, consequently raising maintenance costs, forcing managers and researchers to find new alternatives to improve utilization of materials, decrease energy consumption used in the executions, streamline restoration interventions, and more. Another important factor that stands out is the environmental issue, where it is directly affected in the construction and maintenance of highways, whether in the consumption of natural materials, in the movements of lands, in the fuels used, etc. The Rolled Compacted Concrete (RCC) appears as a material that fits within this perspective, since, in some cases, it has as a proposal to reduce the cement consumption and the time of execution, And it still has a long service life without a need for maintenance, thus being technically and economically attractive. Another point in your favor is the fact that the same equipment as the asphalt paving is used. Still the RCC, after being hardened, for a given cement consumption may have similar or superior characteristics to the conventional vibrated concretes. One of the characteristics of concrete in general is that it allows the incorporation of other materials, such as reclaimed asphalt pavement (RAP). This has a positive impact on the concrete construction economy. The objective of this work was to analyze three mechanical strength of roller compacted concrete (RCC), with partial replacement of the large aggregate by RAP, in the percentages of 10% and 30% for use in pavement bases, with different cement consumption in different curing ages. The tested mixtures were dosed with 100 and 150 kg of cement per cubic meter, typical values for RCC used in bases layers, totaling in six researched mixtures. The properties studied were simple compression strength, tensile strength by diametrical compression and the tensile strength in the flexion at 7 and 28 days of cure. The effects of RAP percentage, cement consumption and curing time were analyzed by compacting the test specimens in the intermediate energy. The main results showed that the performance the samples of RCC with 10% of RAP is superior to conventional ones. However, there is a decreasing resistance when the amount of RAP increases to 30%. The RCS of the samples varied from 5,74 to 11,42 MPa at 7 days and from 6,17 to 16,27 MPa at 28 days of cure. The RTCD ranged from 0,56 to 1,73 MPa in the 7 days and 0,77 to 2,27 MPa in the 28 days. The RTF obtained values ranging from 0,55 to 1,6 MPa at 7 days cure and 0,87 to 1,96 MPa at 28 days cure. The great influence of curing time on resistances is remarkable.. As for cement consumption, it is possible to affirm that there is a significant improvement in the resistance when a higher consumption of cement is used.

Keywords: Roller compacted concrete. Base pavements. Reclaimed asphalt pavement. Mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composições granulométricas do CCR empregadas no Brasil.	25
Figura 2 - Estrutura interna das ligações entre pasta e agregado no CCR.....	29
Figura 3 - Faixa granulométrica do CCR (dimensão máxima características de 25 mm).....	30
Figura 4 - Sentido do cilindro fresador.....	38
Figura 5 - Dispositivo de reciclagem in situ.....	43
Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	54
Figura 7 - Materiais britados virgens.....	55
Figura 8 - Areia utilizada na pesquisa	55
Figura 9 - Curvas granulométricas dos agregados virgens.....	56
Figura 10 - Material fresado asfáltico utilizado na pesquisa.	57
Figura 11 - Curva granulométrica do material fresado, com e sem betume.....	59
Figura 12 - Composição granulométrica adotada para o CCR referência.....	61
Figura 13 - Composição granulométrica adotada para o CCR com 10% de fresado	62
Figura 14 - Composição granulométrica adotada para o CCR com 30% de fresado	62
Figura 15 - Procedimentos do ensaio de compactação.....	65
Figura 16 - Betoneira utilizada para mistura	66
Figura 17 - Mistura final do CCR fresco.....	67
Figura 18 - Moldes preparados com desmoldante para a moldagem	68
Figura 19 - Moldagem dos CPs	69
Figura 20 - CPs cobertos com sacos plásticos até a desmoldagem	70
Figura 21 - Desmoldagem do CP 10 x 6 cm.....	70
Figura 22 - CPs desmoldados e numerados antes da câmara úmida	71
Figura 23 - CPs com as faces capeadas de enxofre	72
Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão simples em andamento	73
Figura 25 - Ensaio de RTCD do CP 10 x 6 cm	74
Figura 26 - Ensaio de RTCD do CP 10 x 20 cm	75
Figura 27 - Posição dos apoios e da carga aplicada para CPs de 400mm de comprimento. ...	76
Figura 28 - Diagrama de esforços solicitantes no ensaio de resistência a tração na flexão.	76
Figura 29 - CPs marcados para realização do ensaio de RTF	78
Figura 30 - (a) CP posicionado na presença para ensaio, (b) ensaio em andamento com início de ruptura, (c) CP rompido, (d) seção do CP rompido	78
Figura 31 - Curvas de compactação do CCR com consumo de 100 kg/m ³ e substituição por 10 e 30% de fresado.....	79
Figura 32 - Curvas de compactação do CCR com consumo de 150 kg/m ³ e substituição por 10 e 30% de fresado.....	80
Figura 33 - Influência do fresado na RCS das misturas com consumo de 100 kg/m ³	82
Figura 34 - Influência do fresado na RCS das misturas com consumo de 150 kg/m ³	82
Figura 35 - Influência do fresado na RTCD das misturas com consumo de 100 kg/m ³	86
Figura 36 - Influência do fresado na RTCD das misturas com consumo de 150 kg/m ³	87
Figura 37 - Ensaio de compressão diametral: (a) CCR referência, (b) CCR com fresado	89
Figura 38 - Imagem aproximada de amostra rompida à compressão diametral.....	90
Figura 39 - Comparação das RTCD em CPs com dimensões diferentes (consumo de 100 kg/m ³)	92

Figura 40 - Comparação das RTCD em CPs com dimensões diferentes (consumo de 150 kg/m ³)	92
Figura 41 - Correlação estatística entre RTCD 10x6 e RTCD 10x20	93
Figura 42 - Influência do fresado na RTF das misturas com consumo de 100 kg/m ³	95
Figura 43 - Influência do fresado na RTF das misturas com consumo de 150 kg/m ³	95
Figura 44 - Relação entre RTCD e RCS aos 7 dias de cura	99
Figura 45 - Relação entre RTCD e RCS aos 28 dias de cura	100
Figura 46 - Relação entre RTF e RCS aos 7 dias de cura	101
Figura 47 - Relação entre RTF e RCS aos 28 dias de cura	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de golpes por camada para moldagem de CPs cilíndricos (15x30cm).....	33
Tabela 2 - Número de golpes por camada para moldagem de CPs prismáticos (15x15x50cm).	34
Tabela 3 - Tipos de reciclagem.....	44
Tabela 4 - Quantidades de CPs para cada ensaio.	53
Tabela 5 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens	56
Tabela 6 - Caracterização dos agregados britados virgens.....	57
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do material fresado com e sem betume.	58
Tabela 8 - Teor de betume do fresado.	59
Tabela 9 - Densidade máxima medida.	59
Tabela 10 - Proporções das misturas	61
Tabela 11 - Planilha criada para cálculo do traço unitário do CCR em função do consumo de cimento desejado	64
Tabela 12 - Características da moldagem.....	68
Tabela 13 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação.....	81
Tabela 14 - Valores de resistência à compressão simples de CPs 10 x 20 cm.....	81
Tabela 15 - Taxas de variação nos ensaios de RCS, com consumo de cimento de 100 kg/m ³	84
Tabela 16 - Taxas de variação nos ensaios de RCS, com consumo de cimento de 150 kg/m ³	84
Tabela 17 - Valores de resistência à tração por compressão diametral de CPs 10 x 20 cm.....	86
Tabela 18 - Taxas de variação nos ensaios de RTCD dos CPs 10 x 20 cm, com consumo de cimento de 100 kg/m ³	88
Tabela 19 - Taxas de variação nos ensaios de RTCD dos CPs 10 x 20 cm, com consumo de cimento de 150 kg/m ³	88
Tabela 20 - Valores de resistência à tração por compressão diametral de CPs 10 x 6 cm.....	91
Tabela 21 - Variação de RTCD entre CPs 10 x 20 cm e 10 x 6 cm	91
Tabela 22 - Valores de resistência à tração na flexão.....	94
Tabela 23 - Taxas de variação nos ensaios de RTF, com consumo de cimento de 100 kg/m ³	97
Tabela 24 - Taxas de variação nos ensaios de RTF, com consumo de cimento de 150 kg/m ³	97

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AB & AT	Técnica de Abrasão e Atrito
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AF	Agregado fino
AG	Agregado graúdo
ANOVA	Análise de Variância
ARI	Alta Resistência Inicial
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association
BINDER	Camada de ligação
BR	Brasil
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CC	Consumo de cimento
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CCP	Concreto de Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado com Rolo
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Corpo de prova
CP II-F	Cimento Portland composto com fíler
CV	Coefficiente de variação
D	Diâmetro do CP
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DMM	Densidade Máxima Medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRAP	Fresado sujo
Ep	Energia potencial
ERS	Rodovia estadual
ES	Especificação de serviço
EUA	Estados Unidos da América
<i>F</i>	Força máxima alcançada
FHWA	Federal Highway Administration
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
GC	Grau de compactação
<i>h</i>	Teor de umidade
I	Intermediária
ISC	Índice de Suporte Califórnia
J/cm ³	Joule por centímetro cúbico
Kg	Quilograma
Kg/dm ³	Quilograma por decímetro cúbico
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
Km	Quilômetro

kN/s	Quilonewton por segundo
L	Altura do corpo de prova
L/m ³	Litro por metro cúbico
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
M	Modificada
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
ME	Método de ensaio
MEAS	Massa específica aparente seca
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MPa/s	Mega Pascal por segundo
MR	Módulo de resiliência
N	Normal
NBR	Norma Brasileira
PCA	Portland Cement Association
PE	Pernambuco
PMF	Pré-misturado a frio
PMQ	Pré-misturado a quente
R ²	Coeficiente de determinação
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCS	Resistência a Compressão Simples
RS	Rio Grande do Sul
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTF	Resistência à Tração na Flexão
SC	Santa Catarina
SP	São Paulo
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	United States Army Corps of Engineers
WRAP	Fresado lavado
γ_a	Massa específica do agregado total,
γ_c	Massa específica do cimento
P	Peso do soquete
V	Volume de vazios
a	Distância média entre a linha de ruptura e a linha do apoio mais próximo
b	Largura média do corpo de prova
d	Altura média do corpo de prova
F	Carga máxima
l	Dimensão do vão entre apoios
m	Quantidade de agregados total por quantidade de cimento
%	Porcentagem
f_c	Resistência à compressão
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$f_{t,D}$	Resistência à tração por compressão diametral
n_c	Número de camadas
n_g	Número de golpes
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)	17
2.1.1	Breve histórico.....	19
2.1.2	Vantagens e desvantagens	21
2.1.3	Materiais empregados	23
2.1.3.1	<i>Agregados</i>	23
2.1.3.1.1	Propriedades.....	24
2.1.3.2	<i>Materiais cimentícios.....</i>	27
2.1.3.3	<i>Água.....</i>	27
2.1.4	Traços/dosagem.....	28
2.1.5	Grau de compactação	32
2.1.6	Energia de compactação.....	33
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CCR	36
2.3	MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO.....	37
2.3.1	Apelo ambiental	40
2.4	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	41
2.5	PESQUISAS SOBRE RECICLAGEM EM CONCRETOS.....	46
3	METODOLOGIA	52
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	52
3.2	MATERIAIS	54
3.2.1	Agregados virgens	54
3.2.2	Cimento	57
3.2.3	Material fresado asfáltico.....	57
3.2.4	Água	60
3.3	MÉTODOS LABORATORIAIS	60
3.3.1	Definição da distribuição granulométrica das misturas.....	60
3.3.2	Dosagem das misturas de CCR.....	63
3.3.3	Ensaio de compactação.....	64
3.3.4	Moldagem dos CPs.....	66
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS	71
3.4.1	Resistência à compressão simples (RCS)	72
3.4.2	Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	73
3.4.3	Resistência à tração na flexão (RTF).....	75
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
4.1	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	79
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS).....	81
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)	85
4.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)	93
4.5	RELAÇÃO ENTRE RTCD E RCS	98
4.6	RELAÇÃO ENTRE RTF E RCS.....	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A utilização do transporte rodoviário no Brasil tanto para movimentação de passageiros quanto para transportes de carga, tem se intensificado ao longo do tempo. Com isso, aumentam-se as solicitações impostas às estruturas de pavimentação e, conseqüentemente, as espessuras das camadas asfálticas dos pavimentos obtidas através de dimensionamentos mecanístico-empíricos. Como é de conhecimento de todos há uma carência enorme de rodovias pavimentadas no Brasil, segundo dados do CNT (2016), elas são responsáveis pela movimentação de 95% dos passageiros e 61,1% do transporte de cargas.

Ao utilizar espessuras mais robustas nessas camadas de revestimento, é possível assegurar ao pavimento uma elevada vida de fadiga, porém ocorre um aumento do risco de rupturas por cisalhamento (afundamentos nas trilhas de roda e trincamentos originados na superfície ou nas proximidades e que se propagam para baixo). Além disso, deve-se atentar à elevação dos custos de construção do pavimento e ao emprego dessa prática rodoviária, a qual não é considerada sustentável, devido à utilização de recursos naturais não renováveis e à geração de emissões prejudiciais ao meio ambiente.

A má qualidade das rodovias, por falta de manutenção adequada, oferece riscos a todos os usuários e implica também em custos elevados, como a manutenção dos veículos, a restauração dos pavimentos, e as despesas de recursos financeiros causados pelos acidentes. O desperdício de diesel dos veículos que transitam em pavimentos inadequados é, em média, de 5%. Em 2016, foi gerado um prejuízo em torno de R\$ 2,34 bilhões pelo consumo desnecessário de 775 milhões de litros de combustível. A emissão de CO₂, proveniente da queima do diesel excedente, atingiu neste ano 2 megatoneladas. Nas vias onde o pavimento é considerado péssimo, o aumento de custo operacional chega a 91,5% (CNT, 2016).

A fim de se evitar essa conjunção de desvantagens técnicas, econômicas e ambientais, e visando proporcionar aos usuários do tráfego, conforto e segurança, na restauração de pavimentos degradados é conveniente estudar-se o emprego de camadas rígidas.

O emprego de concreto compactado com rolo (CCR) na pavimentação é uma alternativa viável, sendo que, tem como proposta reduzir o consumo de cimento e o tempo de execução, e ainda tem uma alta vida útil sem a necessidade de manutenção, assim sendo técnica e economicamente atrativo. Outro ponto a seu favor é o fato de serem utilizados os mesmos equipamentos que a pavimentação asfáltica.

O CCR, depois de endurecido, para um dado consumo de cimento pode apresentar características similares ou superiores aos concretos convencionais vibrados, com a vantagem

da utilização dos equipamentos dos pavimentos asfálticos tradicionais utilizados na construção (MOLINA, 2002).

Uma das características do concreto em geral, está no fato de ele permitir na sua composição a incorporação de outros materiais, como o material fresado asfáltico. Tem-se assim um impacto positivo na economia da construção com concreto.

Seguindo uma visão aprimorada de conservação ambiental, muitos trabalhos têm sido realizados com o intuito de utilizar ou reutilizar materiais, em todas as áreas, como forma de minimizar os impactos ambientais. Na pavimentação rodoviária tem se dado muita atenção a esses conceitos de preservação ambiental, já que este tipo de obra é uma das que mais impactam o meio ambiente.

Dadas estas características favoráveis ao emprego de bases rígidas e de grande durabilidade para pavimentos, o CCR passou nas últimas duas décadas a ser um material de grande interesse. Por tratar-se de um material versátil, é possível que seu emprego (em pequena, média e grande escala) venha contemplar a introdução de materiais alternativos, desde que técnica e economicamente justificável. Com isso, os métodos de reciclagem de pavimentos têm ganhado a simpatia dos órgãos de gestão e da sociedade, por serem alternativas técnicas politicamente corretas e economicamente viáveis. Segundo Bonfim (2011), entre diversos tipos de reciclagem de pavimentos existentes, a fresagem é o procedimento aplicado para recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente. O método possibilita a reobtenção dos agregados em forma granular, mesmo que envoltos por ligante envelhecido, em função do desgaste da camada, com sua granulometria alterada.

A pesquisa desenvolvida na UFSM, que buscou estudar misturas de CCR com incorporação de material fresado asfáltico, contemplou inicialmente dois eixos, o primeiro que foi abordado pela presente dissertação, fornece a avaliação de propriedades mecânicas de misturas de CCR com material fresado, para a utilização em base de pavimento, através de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral e resistência à tração na flexão. O outro eixo, abordado por outro pesquisador, buscou avaliar as propriedades mecânicas de misturas de CCR com material fresado, para a utilização em base de pavimento, através dos ensaios de módulo de elasticidade, módulo de elasticidade por Pulso Ultrassônico e módulo de resiliência.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo analisar as resistências mecânicas do concreto compactado com rolo (CCR), com substituição parcial do agregado graúdo por fresado (RAP) para uso em base de pavimentos, com diferentes consumos de cimento em idades de cura distintas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o propósito de se alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Efetuar a compactação do CCR para determinação da umidade ótima, com consumo de cimento de 100 e 150 kg/m³ e substituição de 0, 10 e 30% do agregado graúdo por fresado;
- b) Moldar corpos de prova (CPs) cilíndricos e prismáticos para posterior avaliação das propriedades mecânicas aos 7 e 28 dias;
- c) Avaliar a Resistência à Compressão Simples (RCS);
- d) Avaliar a Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD);
- e) Avaliar a Resistência à Tração na Flexão (RTF).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda cinco temas centrais referentes à dissertação, os quais corresponde ao Concreto Compactado com Rolo (CCR), aos fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do CCR, ao fresado asfáltico, à técnica de reciclagem de pavimentos, além de descrever algumas pesquisas já realizadas a respeito do assunto.

Primeiramente sintetiza-se o CCR em âmbito geral, dando sequência à um breve histórico da utilização desse tipo de base e suas vantagens e desvantagens, também são descritos nesta primeira parte os materiais normalmente utilizados para obter tais misturas. Além disso, abordam-se assuntos como os traços e dosagens normalmente empregados, grau e energia de compactação.

Na segunda parte, são apresentados alguns fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do CCR.

Já na terceira parte, são expostos conceitos do material fresado asfáltico, assim como tipos e processos para obtenção do mesmo, os fatores que influenciam na composição granulométrica e sua importância na questão ambiental.

Conclui-se a revisão descrevendo de modo geral a reciclagem de pavimentos e relatando experiências internacionais e nacionais de pesquisas sobre concretos e CCR com e sem a utilização de fresado.

2.1 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

O CCR também conhecido como concreto rolado ou concreto pobre rolado, trata-se, segundo o American Concrete Institute (ACI, 1987 apud Pinto, 2010), de um concreto seco de ampla utilização na construção de barragens, pisos industriais e estruturas de pavimentos. Segundo o manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005), é um concreto seco, de consistência rija e trabalhabilidade tal que lhe permite ser compactado por rolos compressores, vibratórios ou não, em lugar de ser adensado por vibradores de imersão ou equipamento semelhante normalmente empregado nos concretos tradicionais de pavimentação. Diferentemente dos concretos convencionais, o CCR é consolidado por compactação resultando geralmente em um menor teor de água que os concretos convencionais (NANNI et al., 1996).

O CCR pode ser utilizado como material de base, sub-base ou camada de superfície dos pavimentos. A utilização do CCR como camada de base, é muito favorável, já que fornece ao

pavimento uma camada rígida, melhorando a durabilidade do revestimento asfáltico (ACI COMMITTEE, 1995).

A textura superficial do pavimento de concreto compactado com rolo é áspera, o que tem limitado a sua aplicação em áreas onde a baixa velocidade e o tráfego de carga pesada conformam o principal uso do pavimento. Eventualmente, quando o CCR for aplicado em revestimento, é recomendada a associação de rolos de pneus e rolos lisos para melhorar o acabamento da superfície de rolamento (PITTA et al,1995).

No Brasil, as primeiras obras realizadas com CCR aconteceram no ano de 1972, na cidade de Porto Alegre, sendo utilizado inicialmente como base de pavimentos flexíveis de vias urbanas, sendo o uso mais comumente voltado para a base de pavimentos asfálticos. Como revestimento, já foi utilizado em ruas, estacionamentos, pátios industriais, levando a um bom desempenho em todos os casos apresentados (PITTA, 1994).

O CCR apresenta consumo de cimento menor que os convencionais normalmente empregados em pavimentação, conforme a norma DNIT 056/2004 podem variar de 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 para utilização em sub-bases de pavimentos, já para revestimentos o consumo deverá ser superior a 200 kg/m^3 . De acordo com o estudo técnico de Pitta (1998) os conteúdos de cimento típicos para base atingem 150 kg/m^3 e 180 kg/m^3 , ou mais, ainda. Segundo o ACI committee 327 (2004, apud Pinto, 2010), não há restrições quanto ao tipo de cimento a ser utilizado nesta tecnologia, podendo ser empregado até mesmo o de alta resistência inicial, mas recomenda-se o uso dos cimentos de alto forno, pozolânicos ou com filler.

Godinho (1988) cita que o CCR deve apresentar valores de resistência à compressão simples, aos 28 dias de idade entre 5 MPa e 8 MPa. Já para Pitta (1998) um CCR com um consumo de 135 kg/m^3 tem propriedades típicas de resistência à compressão simples de 11 MPa, de resistência à tração na flexão de 2,5 MPa, sua massa específica aparente máxima seca seria entre 2150 a 2300 kg/m^3 e seu módulo de elasticidade à compressão de $0,6$ a $3,5 \times 10^4$ MPa.

Santos (1988) afirma que a principal diferença entre o CCR e o concreto plástico (vibrado) é a maior quantidade de material fino, apresentando estrutura granular tal que pode ser compactado mecanicamente. Ao dosar as misturas para mínimos volumes de pasta, a função principal dos finos é ocupar o espaço que, de outra maneira, seria ocupado por cimento e água.

A tecnologia do CCR é largamente conhecida e difundida nas construções de barragens e obras onde se utilizam grandes volumes de concreto, objetivando, assim, a minimização do calor de hidratação.

A economia que o CCR oferece para obras de barragens de gravidade, segundo o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA - USACE (2000 apud Andriolo, 1989), é devido aos

seguintes fatores: seu custo é de 25 a 50% menor do que o concreto convencional, a quantidade de cimento é menor, sua construção é mais rápida e a mão-de-obra por unidade de volume é reduzida. Andriolo (1989) acrescenta que existe uma redução sensível no uso de formas e redução na infraestrutura de apoio.

O ACI (1995) apresenta duas diferenças básicas do CCR em relação ao seu emprego em pavimentos e barragens, sendo elas:

a) dimensão máxima do agregado – no emprego do CCR em pavimentação, recomenda-se uma dimensão máxima característica de 12,5 mm à 32,0 mm, quando utilizado em barragem esta pode chegar a 150 mm;

b) consumo de cimento – o concreto massa utilizado em barragens deve ter consumos de cimento menores, dado o baixo calor de hidratação desejado.

Quando utilizado como base, tem como principais funções uniformizar o suporte da fundação, evitar o efeito danoso do bombeamento de finos plásticos, sendo sua principal função aquela de absorver tensões de tração na flexão oriundas da aplicação das cargas pelos veículos. Ainda como base, tem como principais características ser mais resistente às erosões, reduzir as deformações verticais nos pavimentos (deflexões) e aumentar a eficiência de transferência de carga em juntas do pavimento de concreto. O CCR apresenta também em relação ao pavimento de concreto convencional, menor custo em função do menor consumo de cimento (RICCI 2007).

O processo construtivo do CCR não necessita de desempenamento, o que não garante por sua vez um acabamento superficial rebuscado quanto à irregularidade longitudinal da superfície pós-construção. Neste contexto, sua utilização como base se torna interessante visto que não há necessidade de desempenamento, pois a camada de rolamento superior (de concreto ou asfáltica) fornecerá a regularidade e planicidade desejada (PINTO, 2010).

2.1.1 Breve histórico

O emprego do CCR na construção de pavimentos não é recente. A primeira aplicação de CCR que se tem notícia foi realizada na Escócia em 1865. Entretanto, segundo Pasko (1998 apud Silva, 2006), por iniciativa de George Bartholomew, em 1893 em Bellefontaine, o Estado de Ohio nos Estados Unidos da América (EUA) construiu o que se pode definir como o primeiro pavimento de CCR, por apresentar consistência seca e ter sido aplicado pelo processo de compactação.

Posteriormente, por volta de 1910, em Grand Forks, Dakota do Norte (EUA), empregou-se o CCR também em pavimento urbano e em 1935 em estradas rurais na Bélgica (PITTA, DIAZ, 1991).

Entretanto, Fujimura et al. (1995) explicam que o CCR em obras de pavimentação teve aplicação sistemática e fundamentada em dados experimentais a partir de 1944 na Inglaterra, sendo dignos de notas as rodovias Crawley, com 70 km, e a de Londres – Birmingham, com 100 km.

Pitta e Diaz (1991) ainda comentam sobre o uso do CCR em um trecho experimental da rodovia 441 nos EUA em 1950 e, entre 1950 e 1960 a execução de várias rodovias de vários estados norte-americanos onde se destacam os Estado do Texas e Carolina do sul.

Conforme Pittman (1985 e 1989), Gomez (1987) e Jofré (1991), embora a origem do CCR seja anterior a 1970, há uma concordância quase que unânime entre os pesquisadores, que uma nova era para o CCR começa a partir da década de 70 do século passado, impulsionado, principalmente, pela crise do petróleo, que encareceu o custo da construção rodoviária com concreto asfáltico.

A partir da metade da década de 1980, outros países começaram a fazer experiências com o CCR, procurando adaptar essa tecnologia às suas condições regionais. Dentre eles citam-se o Japão, a Austrália, a África do Sul, a Noruega, a Suécia, o Chile e a Argentina.

Em 1990, mais de 4.000.000 m² de pavimentos de CCR haviam sido executados. Em autoestradas, o CCR tem um revestimento asfáltico com cerca de 3 a 5 cm de espessura (DNER,1992).

Existem alguns registros históricos da utilização do CCR no Brasil no ano de 1946 na pavimentação do Vale do Anhangabaú. Em 1950 houve a pavimentação do aeroporto paulista de Congonhas e alguns pavimentos no Rio de Janeiro no ano de 1954 (ANDRIOLO, 1998).

No Brasil, as primeiras obras que utilizaram o CCR como bases de pavimento asfáltico datam de 1972 na cidade de Porto Alegre, sendo empregado como camada de base de pavimentos semirrígidos nas avenidas Sertório, Bento Gonçalves, 1^a e 2^a Perimetrais e Osvaldo Aranha. De acordo com a ABCP (1990), até por volta de 1986, o CCR foi empregado em um número reduzido de obras de pavimentação, embora elas fossem importantes, como por exemplo, na Serra do Rio do Rastro, em Santa Catarina: SC – 438 (1984), e postos de pesagem do DNER em Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, entre outros (1984). Nestas obras, o CCR foi empregado como camada inferior do pavimento (base e sub-base).

Segundo Pitta (1995), até o ano de 1995 foram executados mais de 2.000.000 m² de pavimentos em CCR, largamente utilizado como base de pavimentos flexíveis.

Conforme Carvalho (2016) uma tendência que começou a ser empregada no Brasil na década de 1980 hoje está consolidada nas principais obras das rodovias brasileiras, segundo o qual esse tipo de concreto é usado como sub-base na pavimentação de praticamente todas as grandes rodovias do país. Atualmente, o CCR é uma das melhores alternativas de sub-base para pavimento. Além da aplicação rápida e prática em comparação a outras opções, ele possui maior durabilidade e resistência à erosão, salienta o autor.

Ricci (2007) aponta que nos últimos anos, algumas rodovias brasileiras pavimentadas com concreto simples, utilizaram base de CCR. Além das Marginais da Rodovia Castelo Branco - SP (2002), Rodovia dos Imigrantes – SP (2002), SP 79 (2001), BR 232 - PE (2003), cabe destacar o Rodoanel Mário Covas, onde a maior parte do projeto utilizou do CCR como base de pavimentos.

Diversos corredores de ônibus no Brasil têm utilizado esta tecnologia, com destaque para os corredores das cidades de Curitiba, Porto Alegre e São Paulo. Nos últimos anos, os pontos de parada e os Terminais de ônibus integrantes do projeto Passa Rápido da Prefeitura Municipal de São Paulo foram executados com CCR como base de pavimento de concreto simples.

2.1.2 Vantagens e desvantagens

Uma das principais vantagens que oferece o uso do CCR está no fato de ele não necessitar equipamentos especiais para a sua construção. Além disso, as pequenas exigências em relação a mão de obra e ritmo de construção resultam em gastos menores se comparados a outros métodos construtivos. Adicionalmente, tem-se que destacar que os pavimentos de CCR oferecem uma abertura imediata ao tráfego devido à estabilidade que o esqueleto dos agregados possui logo após a compactação (MOLINA, 2002). Conforme Carpio (2009), Andriolo (1989), Andrade (1997), Pitta (2002) e Carvalho (2002) o CCR também proporciona:

- a) Economia de cimento: a grande densidade alcançada com os rolos vibratórios, faz com que o CCR tenha maior resistência que o concreto convencional com igual teor de cimento, havendo assim uma importante economia no consumo de cimento por metro cúbico;
- b) Velocidade de construção: a grande eficiência na produção e na construção faz com que a velocidade de execução da obra seja 2 ou 3 vezes superior à dos pavimentos de concreto convencional e dos pavimentos asfálticos;

- c) Maior resistência à fadiga por flexão: um pavimento de CCR tem melhor comportamento à fadiga por flexão que um concreto convencional de igual resistência devido a que a mínima porcentagem de vazios alcançada no CCR faz o pavimento mais resistente ao trincamento;
- d) Vida útil de mais de 20 anos, com pouca manutenção;
- e) O emprego desta tecnologia pode propiciar uma economia de 15% a 30%, se comparado com estruturas convencionais equivalentes (PITTMAN – 1986 e WHITE – 1989).

A Portland Cement Association (PCA, 2004) relata que o CCR quando usado na pavimentação pode apresentar benefícios tais como:

- a) Alta resistência à tração na flexão quando solicitado por carregamentos pesados e repetitivos reduzindo a manutenção;
- b) Alta resistência à compressão, resistindo a altas cargas concentradas e impactos de equipamentos industriais pesados, equipamentos militares, etc.
- c) Possui alta resistência ao cisalhamento, reduzindo a ocorrência de fissuras e manutenção precoce;
- d) Possui alta densidade e baixa absorção, ocasionando maior durabilidade, melhor suporte quanto às condições adversas das intempéries e não permite a passagem de umidade para as camadas subsequentes do pavimento;
- e) Quanto ao agregado usado, desenvolve alta resistência ao cisalhamento devido ao aparecimento de juntas e fissuras não controladas, prevenindo o deslocamento vertical e horizontal do pavimento;
- f) Disponibiliza altas velocidades de execução sem necessitar equipamentos especializados ou de alta tecnologia, reduzindo custo; e,
- g) Ocasiona uma superfície mais durável por resistir à abrasão.

Mesmo assim, o CCR apresenta certas limitações em seu uso. Por exemplo, as variações na umidade e a compactação não adequada estão ligadas ao comportamento final deste tipo de concreto (resistência mecânica, durabilidade). Para rodovias de alta velocidade, ainda não se conseguiu uma regularidade superficial satisfatória. Assim faz-se necessária a execução de uma camada de asfalto de revestimento para atender as exigências quanto à irregularidade (MOLINA, 2002).

Para Balbo (1996) as principais limitações tecnológicas estão ligadas à pequena quantidade de argamassa existente na mistura acarretando problemas de heterogeneidade nos materiais. Existem limitações técnicas e de custo quanto ao aumento de consumo de cimento

para estas bases, tornando-as inviáveis. A heterogeneidade do material implica em porosidade heterogênea e também influencia negativamente na fadiga do material em serviço.

Ainda Balbo (2005) diz que, o processo de fadiga, associado à formação de fratura progressiva na estrutura interna da matéria, é resultado da nucleação de microfissuras, a abertura e propagação das mesmas. A grande quantidade de poros não preenchidos por argamassa age de modo desfavorável, resultando em evolução das fissuras de forma mais rápida que em um concreto, resultando em fendilamentos em forma de blocos. Estes blocos apresentam movimentos entre si que sob a ação de cargas, afetam o revestimento asfáltico. Este processo de degradação por fadiga na base cimentada, na maioria dos casos, exige algumas ações de manutenção que implicam em demolição e remoção do revestimento e da base comprometida.

2.1.3 Materiais empregados

Os principais materiais utilizados na produção do CCR são os mesmos empregados no concreto convencional, ou seja, agregados graúdos, agregados miúdos, cimento Portland, água e aditivos, quando houver necessidade de seu emprego.

2.1.3.1 Agregados

De acordo com PETRUCCI (1981) entende-se como agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia.

De uma forma ideal, os agregados para CCR podem ser naturais ou artificiais desde que atendam às normas vigentes. Não obstante, deve-se manter as limitações para os teores de substâncias prejudiciais como certos silicatos e micas, pois podem gerar expansões incontroladas.

A seleção de agregados e o controle das suas propriedades, principalmente a granulometria, são fatores importantes que influenciam a qualidade e uniformidade da produção do CCR. Os agregados constituem, aproximadamente, oitenta por cento do seu volume, e, portanto, é de extrema importância dispor, ao menor custo possível, de agregados da qualidade adequada (IECA, 1996).

O agregado graúdo pode ser pedra britada ou não britada, concreto reciclado, ou uma combinação destes. O tamanho nominal máximo do agregado normalmente não deve exceder

os 19 mm particularmente se a textura do pavimento é importante (USACE, 1995). Limitar o tamanho máximo nominal a 19 mm, ou menos, e utilizar granulometrias contínuas usualmente resulta numa menor segregação do agregado graúdo na mistura (IECA, 1996).

O agregado miúdo pode ser areia natural, areia industrial ou uma combinação de ambas. Areias com altas quantidades de partículas siltosas não plásticas podem trazer benefícios devido ao fato de atuarem como filer mineral e ajudarem na redução da quantidade de cimento requerida. Entretanto, misturas que contenham agregados finos com excessiva quantidade de argila podem necessitar de um maior volume de água resultando em trincamentos, fraturas e redução da resistência (USACE, 1995).

Andriolo e Sgarboza (1993) comentam que os agregados utilizados no concreto devem possuir três funções principais:

- a) Servir como um enchimento relativamente barato para o material aglomerante;
- b) Formar uma estrutura de partículas que seja adequada para resistir a ação das cargas aplicadas, à abrasão, à percolação da água e a ação do tempo; e,
- c) Reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega e endurecimento e da variação de umidade na pasta de água e cimento.

2.1.3.1.1 Propriedades

a) Agregados Graúdos

A norma da ABNT NBR 7211/2009 define agregado graúdo como, pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. As principais propriedades de interesse são as seguintes:

- Granulometria

Geralmente, se denomina composição granulométrica de um agregado a proporção relativa expressa em % dos diferentes tamanhos de grãos que se encontra constituindo o todo e pode ser expressa pelo material que passa ou pelo material retido, por peneira ou acumulado.

Para ANDRIOLO (1989), a escolha e controle granulométrico dos agregados são fatores importantes que influenciam na qualidade e nas propriedades do CCR. Portanto, quanto à distribuição granulométrica para o CCR, três pontos merecem atenção: a escolha do diâmetro máximo, o teor aceitável de material pulverulento no agregado e a adição de finos.

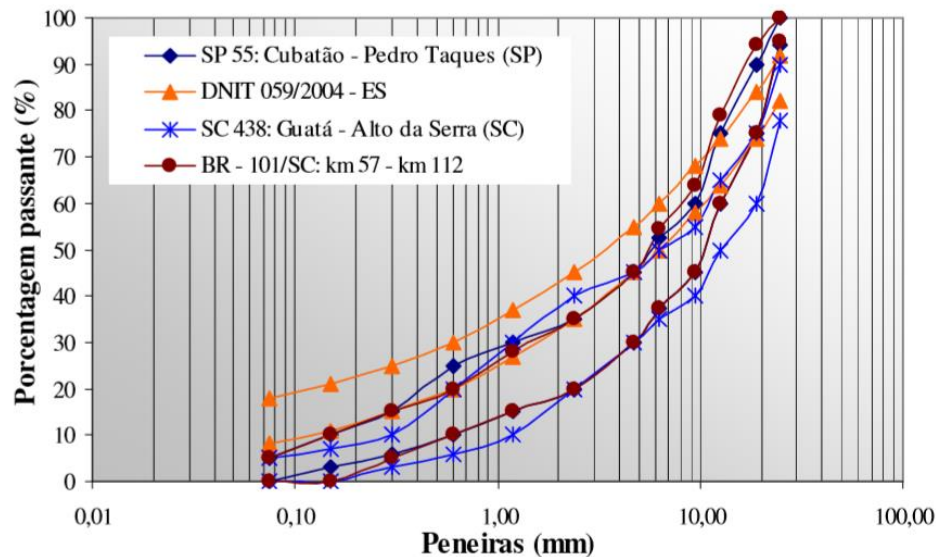
Quanto a Dimensão máxima característica do agregado ($D_{m\acute{a}x.}$), Jofre et al (1989) comentam que na Espanha é recomendada à utilização de agregados com $D_{m\acute{a}x.}$ de 19 mm e

na França, é preconizado $D_{m\acute{a}x.}$ de 14 mm ou 16 mm, conforme o tipo de rodovia, sendo que lá este parâmetro é estabelecido para diminuir a probabilidade de segregação do CCR e permitir um bom acabamento superficial (DIAZ, 1993).

Já Pitta (1995) recomenda quanto à granulometria, utilizar agregados com dimensão máxima de 38 mm. Apesar de não haver restrições quanto a utilização de agregados com dimensão máxima característica de 38 mm, tem se notado alguma dificuldade quando da compactação do concreto e posterior regularização da superfície. Neste caso, a recomendação é a utilização de agregados com dimensão máxima característica de 19 mm.

Marques (2001) comenta que a graduação é, talvez, a propriedade mais importante de um agregado. Ela afeta quase todas as propriedades importantes de uma mistura incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência por atrito e resistência à fadiga e resistência ao dano por umidade. Na Figura 1 são apresentadas algumas curvas granulométricas usualmente empregadas no Brasil.

Figura 1 - Composições granulométricas do CCR empregadas no Brasil.



Fonte – Marques (2001).

- Desgaste por Abrasão

Conforme as especificações da norma DNER – ME 035/98, o desgaste por abrasão Los Angeles é uma medida preliminar da resistência do agregado graúdo à degradação por abrasão e impacto, referindo-se ao uso de agregados na execução de camadas de base e revestimento e,

normalmente, indicam limitações para o valor da Abrasão Los Angeles contido entre 40% e 55%.

- Massa específica

Petrucci (1981) comenta que a importância da massa unitária decorre da necessidade, na dosagem de concretos, de transformação de traços em peso para volume e vice-versa, bem como para cálculos de consumo de materiais empregados por m³ de concreto.

O procedimento, comumente chamado de cesto metálico, é realizado através da norma DNER-ME 195/97, para determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.

- Substâncias nocivas

A norma DNER-EM 037/97 determina as quantidades de substâncias nocivas que não devem ser ultrapassadas pelos agregados, como torrões de argila, materiais pulverulentos e materiais carbonosos.

- Outros

A norma DNER-EM 037/97 também determina outras propriedades, como, a resistência ao esmagamento, que deverá ter 55% para concretos que não sofram desgaste superficial e durabilidade quando submetido ao ensaio de sanidade.

b) Agregados Miúdos

Já para agregados miúdos a norma ABNT NBR 7211/2009 caracteriza por ser, areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

Onde os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, duráveis e limpos. Na norma DNER-EM 038/97 cita que o agregado miúdo não deve variar o módulo de finura de mais 0,2.

- Massa Específica

Como o agregado geralmente contém poros, tanto permeáveis como impermeáveis, o sentido do termo massa específica deve ser cuidadosamente definida. A massa específica é a massa de uma unidade de volume do agregado seco, excluindo deste os poros permeáveis, sendo uma propriedade muito utilizada nos cálculos de dosagem (FURNAS, 2002; NEVILLE, 1997).

Geralmente os métodos utilizados para a determinação da massa específica do agregado miúdo são as seguintes:

- Processo do frasco graduado, sendo usado preferencialmente o frasco de Chapman conforme a NBR 9775 (2011);

- Processo do picnômetro, medido através da NBR NM 52:2009; e,

Entre os processos o mais recomendado é o processo do picnômetro por apresentar resultados com grande precisão e, portanto, ser o mais indicado para ensaios em laboratório.

2.1.3.2 *Materiais cimentícios*

Todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados para a execução do CCR (ACI 207,1998; PITTA et al, 1995; DNER, 1992; BUCHER, 1985). Em casos visando um melhor resultado do CCR em função das premissas do projeto, pode-se optar por um cimento com características diferenciadas. Os cimentos utilizados na execução do CCR devem atender às normas técnicas brasileiras quanto aos requisitos mínimos de qualidade.

A escolha do tipo de cimento deverá levar em conta ainda, a disponibilidade existente no local da obra. Devido às dimensões continentais do Brasil, para cada região existe uma disponibilidade maior de um determinado tipo de cimento.

Conforme Andriolo (1989), a principal diferença na escolha e proporcionamento de cimento e material pozolânico usado no CCR, em comparação com os concretos convencionais, é referente à possibilidade de usar altos teores de material pozolânico e a reduzida ênfase sobre o efeito desse material na trabalhabilidade.

Nunes et al. (2013) estudaram o comportamento de materiais da região de Passo Fundo (RS), através de misturas com o emprego de quatro teores de cimento Portland CP V ARI (1%, 2%, 4% e 8%). Os autores concluíram que a adição de cimento elevou a resistência das misturas, e que a utilização do cimento CP V ARI seria uma boa escolha para tais misturas.

Taha et al. (2002) desenvolveram um estudo a partir da análise da RCS de misturas de fresado asfáltico (de 0 a 100%), agregado virgem e cimento Portland Tipo I (de 0 a 7%) aos 2, 7 e 28 dias de cura. Observaram que a resistência das composições aumentou com a adição de agregado virgem e cimento. Verificaram também que a influência da adição de cimento é mais significativa do que a inclusão de agregado virgem.

2.1.3.3 *Água*

A melhor porcentagem de água dentro de um metro cúbico de CCR varia entre 4 e 7% do peso dos materiais secos, sendo necessários, na maioria dos casos, de 110 a 130 litros/m³ de água, ou seja, aproximadamente 70% da água que normalmente utiliza-se para fabricar um concreto comum (mais ou menos 190 litros /m³) (PITTA, 1994).

O CCR é muito sensível à variação do conteúdo da água. A falta de água aumenta o risco de segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial. Já o excesso produz falta de estabilidade da mistura durante a compactação. Tanto a falta como o excesso de água produzem diminuição da resistência mecânica do CCR (PITTA, 1994).

2.1.4 Traços/dosagem

Uma metodologia de dosagem de concreto, independentemente de seu tipo, tem por objetivo compatibilizar os materiais disponíveis com os equipamentos destinados à sua produção e execução no campo, com as condições da obra e com as exigências estruturais previstas no projeto visando a se conseguir a composição mais econômica (DIAZ, 1993).

Nos concretos plásticos, praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos os espaços vazios existentes entre os agregados, tornando o volume de ar muito pequeno; por outro lado nos concretos secos, existe a presença de ar em volume significativo na mistura. Deste modo, o concreto seco não segue o princípio consagrado para concretos plásticos que é a necessidade de uma menor quantidade de água para elevação da resistência mecânica (TANGO, 1994).

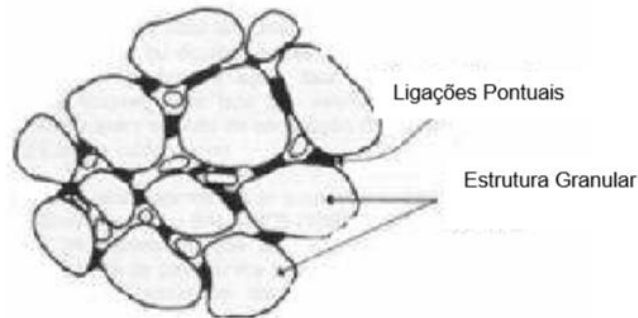
Conseqüentemente, a dosagem do CCR é geralmente executada pelo método do menor volume de vazios, ou seja, consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de maneira a propiciar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados componentes do concreto.

Segundo Balbo (1996), a estabilização química referente a materiais para a execução de bases para pavimentos pode se dar de duas maneiras: alterando-se a susceptibilidade de um material à água e conferindo-lhe ganho de resistência como material de construção. No caso do CCR, onde os grãos são maiores que as partículas do cimento, a ação deste ligante hidráulico se restringe a efetuar ligações pontuais entre os grãos, conforme mostrado na Figura 2, porque este tipo de concreto seco possui quantidade insuficiente de argamassa para o completo envolvimento dos agregados como ocorre nos concretos plásticos. Estas ligações pontuais implicam em grande quantidade de vazios não preenchidos, isto é, elevada porosidade.

O baixo consumo de ligante hidráulico em misturas de CCR é originado pelo intertravamento granular da mistura e menor volume de vazios, utilizando assim, faixas granulométricas contínuas em sua dosagem. A faixa granulométrica de melhor adequação à utilização do CCR deve ser determinada mediante ensaios de laboratório, selecionando-se aquela que permita cumprir as especificações de desempenho desejadas para o material (DNER,

1992). Os diferentes campos de utilização do CCR condicionarão sua resistência e dimensão máxima dos agregados.

Figura 2 - Estrutura interna das ligações entre pasta e agregado no CCR.



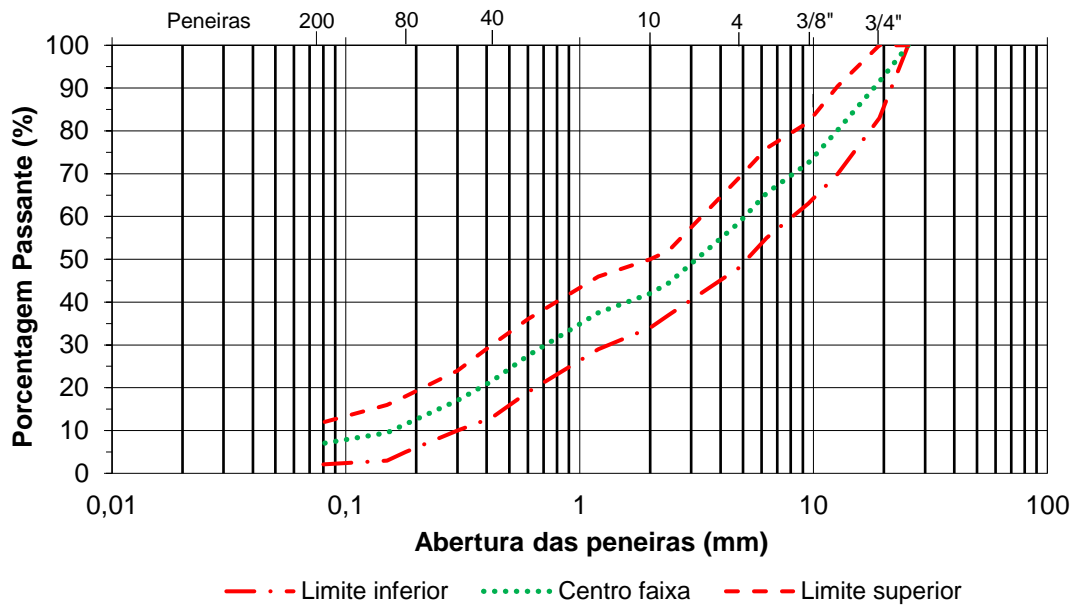
Fonte – Balbo (1996).

Como fator para a diminuição da porosidade e aumento na quantidade de pontos de contato entre os grãos e a pasta de cimento, a busca por uma distribuição granulométrica bem graduada deve ser parte da composição do CCR. Kim (2007) exemplifica como proporções típicas de dosagens de CCR para camadas de pavimento: 75 % a 85 % de agregados com tamanho máximo de 19,0 mm, 9 % a 18 % de ligante hidráulico e 4 % a 7 % de água (em peso).

A metodologia mais conhecida e utilizada em dosagens de CCR é a proposta por Trichês (1993) que foi desenvolvida inicialmente com o objetivo de dosar o CCR para barragens onde o consumo de cimento é menor e conseqüentemente as resistências são baixas.

Esta metodologia também foi adotada por Abreu (2002) no estudo de concreto de alta resistência para pavimentos, Ricci (2007) na utilização de resíduo de construção e demolição (RCD) em CCR para base de pavimentos asfálticos híbrido rígidos e Pinto (2010) na incorporação de escória granulada de alto forno em CCR para base de pavimentos, tendo como faixa granulométrica idealizada por Pittman e Ragan (1998) (Figura 3), a qual leva em consideração o controle da retração no CCR, tendo uma estrutura granular contínua e densa e requerendo menores teores de ligante hidráulico.

Figura 3 - Faixa granulométrica do CCR (dimensão máxima características de 25 mm)



Fonte – Adaptado de Pinto (2010).

Para Trichês (1993), a dosagem do CCR pode ser elaborada com o seguinte procedimento:

- definição da composição granulométrica dos agregados para que a mistura se enquadre na curva escolhida;
- fixa-se o consumo de cimento – C_c , e calcula-se, para diferentes umidades, a proporção C_c : m , através da seguinte expressão:

$$C_c = \frac{1000 - V}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{m}{\gamma_a} + \frac{h(1+m)}{100}} \quad (1)$$

Onde:

C_c = Consumo de cimento da mistura em kg/m^3 ;

V = Volume de vazios na mistura, em litros;

m = Quantidade de agregados total por quantidade de cimento, em 1 m^3 de CCR;

h = Teor de umidade da mistura em %;

γ_c = Massa específica do cimento, em kg/m^3 ;

γ_a = Massa específica do agregado total, em kg/m^3 .

- c) Para um mesmo consumo de cimento, variando-se o teor de umidade, têm-se diferentes quantidades “m” de agregado total. É possível então, através de um ensaio de compactação se determinar o teor de umidade que fornece a massa específica aparente seca máxima da mistura – MEAS máx.

Para a utilização da equação 1, adota-se, por tentativa, um volume de vazios V, por exemplo, igual a 5%, o que representa 50 litros em 1m³ de CCR.

Quanto ao volume de vazios, Abreu (2002) comenta que este é um parâmetro para a avaliação da compacidade de um material, sendo muito utilizado na mecânica dos solos. Em agregados para concreto pode ajudar a definir a qualidade de uma areia principalmente no que diz respeito à sua distribuição granulométrica. Portanto, quanto menor for este índice melhor é o arranjo entre os grãos, menor será o consumo de cimento da argamassa e do concreto, resultando em adequada coesão e compacidade da mistura.

Cannon (1993), afirma que o volume de ar requerido antecipadamente para uma dosagem experimental de CCR é de 5%, posto que Marchand et al. (1998), confirmaram que apesar de grandes variações nas compactações, todas as misturas experimentais estudadas apresentaram um volume de vazios igual a 5%, ou um pouco abaixo deste valor, acreditando que este valor deveria ser considerado convencional em uma variação entre 4% e 5%.

Sachet (2012), conduziu um estudo sobre misturas de CCR com adição de fresado, o autor estudou seis misturas, duas de referência, onde tinha como traço cimento: areia: pedrisco: brita 1, o primeiro traço continha areia natural, era: 1:34:42:24, o outro continha areia industrial: 1:37:39:24. As outras quatro misturas tiveram um tipo de agregado substituído por fresado, a primeira teve 100% da areia industrial substituída por fresado, a segunda teve o pedrisco substituído, a terceira teve a brita 1 substituída e a quarta teve uma substituição de 50% da faixa total de agregados, as porcentagens de fresado utilizado ficaram de 37%, 39%, 24% e 50% respectivamente. O consumo de cimento utilizado foi 100 kg/m³ para todas as misturas com cimento tipo CPIII-40-RS. O autor constatou que o CCR produzido com areia natural apresentou menor massa específica aparente seca que aquele produzido com areia industrial. Os ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão mostraram que a incorporação de RAP, em qualquer fração, diminui bruscamente a resistência mecânica dos corpos de prova, em relação ao CCR de referência, sendo a queda mais acentuada no caso da resistência à tração por compressão diametral.

O mesmo autor conclui que embora a incorporação do RAP na mistura de CCR diminua a resistência das misturas e afete todos os parâmetros mecânicos, ainda assim é um material que

pode ser utilizado como base e sub-base de pavimentos, pois alcançou parâmetros mecânicos que viabilizam seu uso.

2.1.5 Grau de compactação

No CCR um aspecto importante para operação requerida da estrutura refere-se ao grau de compactação (GC) com que o concreto é executado e, manifestações patológicas têm sido associadas à menor compactação, com maior porosidade no concreto. Isto se deve à dosagem, deficiências no equipamento de compactação e também à forma de controle desta compactação.

De acordo com Graça (2004) o uso de densímetro nuclear para controle da densidade do CCR “in situ” e grau de compactação tem sido o método que melhor garante que o CCR está sendo aplicado com os requisitos necessários ao adequado desempenho da estrutura. Todavia, outros métodos de controle da densidade têm sido utilizados, como a membrana plástica e o frasco de areia.

Conforme a norma DNIT 059/2004-ES a massa específica aparente seca deve ser determinada conforme a norma DNER 092/94 e terá que apresentar um grau de compactação superior ou igual a 98%, já nas práticas recomendadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2005) a aceitação automática do GC se dará quando este for superior ou igual a 100% e para atingir este grau o número necessário de passagens normalmente é de 3 a 6 que deve ser estabelecido no início da compactação.

Pitta (1998) diz que o número de passadas necessárias para atingir a compactação desejada deve ser determinado na prática, com a execução prévia de um pequeno trecho experimental; geralmente, são suficientes de 6 a 8 passadas para o rolo tandem liso vibratório, já o rolo liso comum exige 8 a 10 passadas normalmente.

Paiva e Oliveira (2010) desenvolveram um estudo a fim de verificar a influência da compactação no comportamento de misturas recicladas com cimento Portland. Para isso, realizaram ensaios de RCS e RTCD aos 7 dias de cura com GC entre 90 e 100. As misturas analisadas eram compostas de 77% de fresado asfáltico, 20% de agregado e 3% de cimento e foram ensaiadas na energia Proctor Modificada.

Os resultados alcançados por Paiva e Oliveira (2010) demonstraram que a resistência (compressão e tração) é diretamente proporcional ao grau de compactação e que o emprego de maiores GCs acarretam em maiores resistências. Os autores indicam ainda que a adição de cimento pode não apresentar melhora no comportamento das misturas, caso essas não sejam

compactadas o suficiente para promover o arranjo dos grãos, de forma a reduzir o volume de vazios das misturas.

2.1.6 Energia de compactação

Para Diaz (1993), este parâmetro é definido em função do equipamento de construção utilizado na compactação do CCR em campo (rolo compressor) e das características exigidas no projeto estrutural. As principais variáveis que influenciam a compactação do CCR são a composição da mistura, a distribuição adequada da granulometria, a forma das partículas dos agregados e o conteúdo de água livre na mistura.

Conforme a Portland Cement Association (PCA, 2004) a compactação é a fase mais importante da construção da camada de CCR, pois através dela é possível prever alguns parâmetros como a densidade, a resistência, o nível de acabamento e a textura da superfície.

Pitta e Diaz (1991) e Trichês (1993), salientam que as energias tradicionalmente empregadas na compactação do CCR para pavimentação são as mesmas empregadas na compactação de solos, onde se destaca as energias do Proctor a qual se divide em Normal (N), Intermediária (I) e a Modificada (M) que correspondem a 5,8 kgcm/cm³, 12,3 kgcm/cm³ e 26 kg cm/cm³, ou 0,59 J/cm³, 1,27 J/cm³ e 2,70 J/cm³, respectivamente.

A Tabela 1 mostra a quantidade de golpes por camadas com o soquete de 4,5 kg com altura de queda de 45 cm, quando a compactação do CCR é realizada em moldes cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para verificação da resistência à compressão normalmente determinada aos 7 e 28 dias, sendo que esses corpos-de-prova (CPs) são moldados em 05 camadas.

Tabela 1 - Número de golpes por camada para moldagem de CPs cilíndricos (15x30cm).

Energia de compactação	Número de golpes/camadas
Normal (N)	30
Intermediária (I)	65
Modificada (M)	138

Fonte – Adaptado de Diaz (1993).

A Tabela 2 apresenta a quantidade de golpes por camada necessária para a moldagem dos CPs prismáticos de 15 x 15 x 50 cm, destinados à determinação da resistência à tração na flexão, sendo que esses CPs são moldados em 2 camadas.

Tabela 2 - Número de golpes por camada para moldagem de CPs prismáticos (15x15x50cm).

Energia de compactação	Número de golpes/camadas
Normal (N)	160
Intermediária (I)	345
Modificada (M)	733

Fonte – Adaptado de Diaz (1993).

De acordo com a NBR 5738 (2003) é recomendado a utilização de corpos de prova prismáticos de 15 x 15 x 50 cm, todavia, de acordo com adendo normativo baseado no estudo desenvolvido por Cervo (2004), há possibilidade de utilização destas dimensões reduzidas (10 x 10 x 40 cm) sem necessidade de fatores de correção, pois testes estatísticos conduzidos por esta autora confirmaram não existir diferença significativa entre ambos os corpos de prova. Ressaltam-se, assim, inúmeras vantagens para a utilização deste tipo de corpo de prova prismático para CCR: menor consumo de materiais, facilidade de manuseio, produtividade e melhor distribuição da energia de compactação, uma vez que esta é realizada manualmente pelo operador e sujeita à fadiga muscular ao longo de inúmeros golpes.

A energia potencial (E_p) aplicada para a compactação da massa fresca no corpo-de-prova é dada pela Equação 2:

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

Onde:

P = Peso do soquete;

h = altura de queda do soquete;

n_g = número de golpes;

n_c = número de camadas;

V = volume do corpo-de-prova.

Como a energia potencial aplicada em relação ao volume é a mesma para os corpos-de-prova em relação ao volume com dimensões reduzidas, definindo-se o número de camadas, acha-se o número de golpes necessários.

Pode-se destacar ainda que esta possibilidade representa uma economia de cerca de 60% do material necessário para moldagem, equipamentos também de dimensões reduzidas e, portanto, mais econômicos, leves, acessíveis, menor peso da amostra (ou amostra + molde), conseqüentemente menor quantidade de mão-de-obra, menor espaço ocupado para armazenamento dos corpos-de-prova no laboratório ou em obra entre outras vantagens. De acordo com o exposto, conclui-se que além da viabilidade técnica, esta possibilidade representa menor custo de ensaio, seja para dosagem ou controle tecnológico.

A pesquisa feita por Fedrigo (2015), teve o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de misturas constituídas por fresado asfáltico, brita graduada e cimento, variando-se a porcentagem de fresado (20% e 50%), o teor de cimento (2%, 4% e 6%), a energia de compactação (Intermediária e Modificada) e o tempo de cura dos corpos de prova (3, 7 e 14 dias). Os resultados dos ensaios mostraram que todas as variáveis analisadas afetam significativamente a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência das misturas. Em relação à energia de compactação aplicada observou-se que o aumento da energia de compactação permite compensar a utilização de teores mais baixos de cimento no que se refere às resistências (à compressão, à tração e à erosão) e módulos obtidos.

Aranha (2013) avaliou o comportamento mecânico da reciclagem de solo-agregado com cimento a partir de estudos de campo e laboratório. No estudo laboratorial foram realizados ensaios de RCS, RTCD e módulo de resiliência triaxial, sendo analisados diferentes fatores, como tipo de material reciclado, teor de cimento, energia de compactação e tempo de cura. A partir dos resultados, foi possível verificar que todas as variáveis estudadas se mostraram significativas e que os ensaios realizados foram passíveis de avaliar o comportamento mecânico das misturas, com exceção do ensaio de módulo de resiliência (MR), o qual apresentou grande variabilidade nos resultados. Em relação a variação da energia de compactação em laboratório não se mostrou significativa em termos de ganho de resistência à tração, porém se mostrou significativa em termos de resistência à compressão, e que esses resultados podem ser explicados pela diferença de planos de aplicação de carga durante o ensaio em relação ao plano de compactação da amostra. No ensaio de resistência à compressão a aplicação de carga se dá no mesmo plano que a compactação, aumentando a influência da energia de compactação.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CCR

Mehta e Monteiro (1994) comentam que a resposta do concreto às tensões aplicadas não depende somente do tipo de sollicitação, mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto. Tais fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura.

Os autores Pitta e Díaz, (1991) afirmam que o CCR composto para pavimentos tem parâmetros mecânicos que variam, fundamentalmente, de acordo com o consumo de ligante hidráulico, quantidade de água, características dos materiais, métodos e energia de compactação empregada, utilização de aditivos, idade, entre outros.

A umidade de compactação é um dos fatores que afetam as propriedades mecânicas dos CCR. A diminuição da quantidade de água resulta em concretos com menores resistências à compressão e à tração, indicando que este componente deve ser suficiente para assegurar uma hidratação contínua para a mistura (SANTOS, 1988). Entretanto, segundo Pitta e Díaz (1991), se têm verificado, na prática de pavimentação, que maiores valores de resistência são alcançados com umidades um pouco inferiores às ótimas.

Paiva e Oliveira (2010) desenvolveram um estudo a fim de verificar a influência do teor de umidade ótimo no comportamento de misturas recicladas com cimento Portland. Para isso, realizaram ensaios de RCS e RTCD aos 7 dias de cura, na umidade ótima e com variação de $\pm 1\%$ desta. As misturas analisadas eram compostas de 77% de fresado asfáltico, 20% de agregado e 3% de cimento e foram ensaiadas na energia Proctor Modificada.

Os resultados alcançados por Paiva e Oliveira (2010) demonstraram que a resistência (compressão e tração) em relação à variação da umidade, foram melhores com 1% de umidade acima da ótima. Os autores indicam ainda que a adição de cimento pode não apresentar melhora no comportamento das misturas, caso essas não sejam compactadas o suficiente para promover o arranjo dos grãos, de forma a reduzir o volume de vazios das misturas.

Sufian et al. (2009) estudaram a influência da adição de fresado e da variação da umidade em misturas recicladas com cimento e cal hidratada. O material de base utilizado foi a BGS e o teor de agente estabilizador empregado foi igual a 3%. Os ensaios realizados em laboratório verificaram o comportamento mecânico das misturas (RCS, RTCD e módulo de resiliência diametral - MRD) com diferentes idades de cura, a partir da aplicação da energia Modificada.

Foi verificado por Sufian et al. (2009) que o comportamento mecânico das misturas com cimento é superior às composições com cal e que o tempo de cura contribui com o ganho de resistência e rigidez. Com relação à umidade, verificou-se que as misturas com mais fresado são menos sensíveis à água e que o melhor comportamento mecânico foi obtido com umidade inferior à ótima.

2.3 MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO

O fresado também conhecido como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) é o material proveniente da retirada de uma ou mais camadas do pavimento. A técnica de fresagem é aplicada em processos de recuperação, manutenção e restauração de pavimentos deteriorados.

O DNER (1997) define a fresagem de pavimentos como o desbastamento a quente ou a frio de superfícies asfálticas, como parte de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico. Já para Bonfim (2007) conceitua-se fresagem de pavimentos como sendo o corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando a restauração de pavimentos.

Conforme FHWA (2011) RAP é o nome dado aos materiais que são removidos ou reprocessados do pavimento que contém agregados cobertos por ligante asfáltico. Estes materiais são gerados quando os revestimentos asfálticos são removidos para a reconstrução, restauração ou para ter acesso às camadas subjacentes do pavimento.

Segundo Bonfim (2007) a partir da crise do petróleo, na década de 1970, com a escassez de materiais asfálticos mais a crise econômica internacional, os técnicos rodoviários internacionais, em conjunto com os organismos de fomento, voltaram-se para a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas, por meio da reciclagem, de forma a restaurar as condições de trafegabilidade de vias a níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro.

Inicialmente o material da pista era extraído por escarificação do pavimento. Esta técnica foi considerada inadequada, pois implicava a retirada de toda a camada betuminosa, o que tornava impossível extrair apenas uma espessura pré-determinada e também apareciam pedaços muito grandes, que necessitavam ser posteriormente quebrados. Concebeu-se então, a partir da segunda metade da década de 70, o equipamento de fresagem como ferramenta adequada para possibilitar o corte do pavimento em profundidades pré-determinadas. No Brasil

a técnica de fresagem teve início no ano de 1980, nas obras de restauração da via Anchieta em São Paulo.

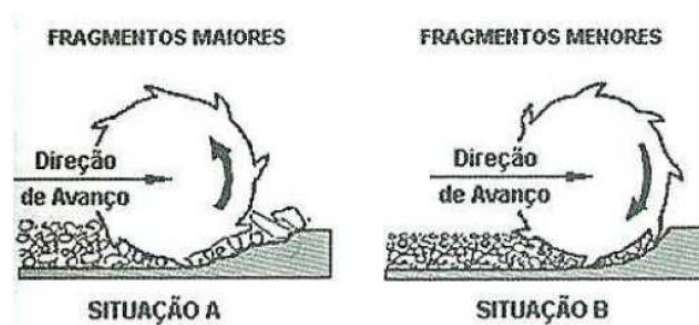
Segundo Bonfim (2007) a temperatura da fresagem pode ser realizada a frio ou a quente. Na primeira situação, o pavimento é fresado à temperatura ambiente, com isto ocorre à quebra de parte dos agregados, havendo a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Na fresagem a quente, o revestimento é pré-aquecido diminuindo a resistência ao corte do material, preservando a integridade do agregado o que conserva a curva granulométrica original do material.

O mesmo autor ainda comenta que a composição granulométrica do material fresado dependerá:

- a) da profundidade de corte;
- b) do grau de oxidação do pavimento;
- c) do estado do pavimento antigo;
- d) do estado dos dentes de corte;
- e) da temperatura ambiente.

O principal componente de uma máquina fresadora é o cilindro fresador, também chamado de rolo fresador. A atuação do cilindro no pavimento (Figura 4) pode ser anti-horária (Situação A) ou horária (Situação B), o que também poderá alterar a granulometria do material resultante. A atuação do cilindro no sentido horário, apesar de resultar em material de dimensões menores, é desfavorável para o corte para grandes espessuras de material oxidado.

Figura 4 - Sentido do cilindro fresador.



Fonte – Bonfim (2007).

Atualmente existem inúmeros trabalhos sobre o emprego de fresado em pavimentação. Pires (2014) por exemplo, conduziu um estudo para avaliar a estabilização granulométrica e

química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos. Os materiais fresados utilizados na pesquisa foram oriundos da BR-290 e da ERS-509. A estabilização granulométrica foi realizada sendo determinado o teor de 70% de material fresado e 30% de agregado natural. Em relação a utilização do fresado o autor concluiu que o ISC da mistura contendo 70% de fresado ficou três vezes maior que do fresado puro, afirmando que uma quantidade baixa de material natural adicionado eleva consideravelmente a capacidade de desempenho do material final. Resultados estes, ISC mistura BR-290 de 95% e para mistura ERS-569 de 68%, já tornam o material apto a ser aplicado em camadas de pavimentos, ao ser determinado ISC mínimo de 60% para bases em estruturas para tráfegos leves. O ISC do fresado puro ficou em 56% (BR-290) e 21% (ERS-569), podendo ser utilizado para sub-bases onde são indicados materiais com ISC acima de 20%.

Um estudo elaborado por Moreira et al. (2006) a respeito de misturas de fresado, pó de pedra e cimento em diferentes quantidades verificou que para cumprir os requisitos exigidos pelo Macopav, manual de concepção de pavimentos da Espanha ($RCS \geq 2,5$ MPa e $RCD \geq 0,3$ MPa), seria necessário o emprego de misturas com 70% de fresado, 30% de pó de pedra e 6% de cimento. Eles ressaltam também que o emprego de misturas com 100% de fresado apresentam variabilidade no comportamento, a qual pode ser explicada por diferentes fatores: volume de vazios considerável (redução da superfície de contato dos agregados de maiores dimensões), superfície de contato com o ligante não permite aderência adequada entre o fresado e o cimento, e ausência de material fino pode favorecer o desenvolvimento de microfissuras (redução da resistência).

As composições estudadas por Isola et al. (2013) compreendem materiais reciclados de pavimento com as seguintes proporções: mistura 1 (70% de agregado fino e 30% de agregado graúdo), mistura 2 (50% agregado fino, 20% de agregado graúdo e 30% de fresado) e mistura 3 (10% de agregado fino, 20% de agregado graúdo e 70% de fresado). Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral para verificar o teor de cimento ideal para obter os parâmetros exigidos pela norma italiana ($2,5 \text{ MPa} \leq RCS \leq 4,5 \text{ MPa}$ e $RCD > 0,25 \text{ MPa}$ aos 7 dias de cura). O teor de cimento definido foi aquele que obteve RCS de 3 MPa aos 7 dias de cura, sendo que os resultados obtidos demonstraram que a quantidade necessária de cimento aumenta de acordo com a elevação da porcentagem de material fresado.

2.3.1 Apelo ambiental

Conforme FHWA (2011) houve um grande aumento da demanda e uma oferta limitada de agregados e ligante asfáltico, os produtores de CBUQ (concreto usinado à quente) começaram então a usar o material fresado como um componente valioso nas misturas de CBUQ. Como resultado, houve um interesse renovado em aumentar a quantidade de fresado usado.

Ainda segundo a FHWA (2011) mais de 90% das estradas e rodovias norte-americanas são construídas com CBUQ. À medida que as infraestruturas envelhecem, as mesmas devem ser reparadas ou reconstruídas. E o material utilizado para construir tais rodovias podem ser reutilizados para este fim, assim tendo sua destinação ecologicamente correta.

No início dos anos 90, a FHWA e a Agência de Proteção Ambiental dos EUA estimaram que mais de 90 milhões de toneladas de pavimento asfáltico foram recuperados todos os anos e mais de 80% do fresado foram reciclados, tornando o asfalto o material mais frequentemente reciclado. O fresado é mais comumente usado como agregado e substituto de ligante asfáltico virgem em reciclagem de pavimentos, mas também pode ser usado como base ou sub-base granular, agregado de base estabilizada e material de enchimento. Ele também pode ser usado em outras aplicações de construção. O fresado é um material valioso e de alta qualidade que pode substituir agregados virgens e aglomerantes mais caros.

Já aqui no Brasil, segundo Balbo (2004) só no município de São Paulo no ano de 2003, foram extraídos de aberturas de valas e restauração de vias públicas, aproximadamente 547.488 toneladas de misturas asfálticas, tanto em bloco como fresado.

Levando em consideração que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação ambiental, o CONAMA estabeleceu diretrizes que levam à minimização dos impactos ambientais. Conforme a resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002, resíduos de pavimentos asfálticos se enquadram nos resíduos resultantes da preparação e da escavação de terrenos. A resolução define que estes resíduos, classe A deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Os dois principais fatores que influenciam o uso do fresado são a economia e os benefícios ambientais. O fresado é uma alternativa que reduz o uso de agregados virgens e a quantidade de ligante asfáltico virgem, que seria necessário para a produção de CBUQ. Com o uso de fresado o gasto energético é minimizado, pois reduz custos de transporte necessários

para obter os agregados virgens de qualidade e preserva recursos. Além disso, o seu uso diminui a quantidade de detritos de construção colocados em aterros. Em última análise, a reciclagem de pavimentos cria um ciclo que otimiza o uso de recursos naturais e sustenta a indústria de pavimentação.

2.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação rodoviária que consiste em reutilizar materiais existentes triturados mais adição de agentes rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos novos, ou ainda com incorporação de agregado para correção granulométrica, de espuma de asfalto, de emulsões asfálticas e até de cimento Portland ou outro aditivo químico (BERNUCCI et al., 2008).

A partir dos anos 80, alternativas que contemplam a reciclagem de pavimentos têm se mostrado favoráveis para os órgãos de gestão e comunidade internacional, já que se trata de uma técnica economicamente viável e também politicamente correta, pois faz uso de materiais existentes, propiciando menor pressão sobre recursos naturais. Além disso, o gasto energético é minimizado tanto com relação à produção como para o transporte dos materiais, o que reduz consideravelmente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) (TRICHÊS et al., 2013).

A Federal Highway Administration (FHWA, 1997) relata que a reciclagem possui algumas vantagens que não são possíveis de alcançar a partir de outras técnicas de reabilitação. Além de evitar o desperdício de materiais, como já citado, a reciclagem consegue manter a geometria e espessura do pavimento e normalmente reduz o tempo de interrupção do tráfego.

De acordo com DNIT - Manual de restauração de pavimentos asfálticos, (2006): a reutilização dos agregados do pavimento degradado para os serviços de reconstrução, restauração e conservação propiciam uma diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, prolongando o tempo de exploração das ocorrências existentes. Isso é particularmente benéfico devido às restrições impostas pela legislação de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrências de jazidas.

A Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos (Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA) define os tipos de reciclagem em cinco categorias distintas, de acordo com o tipo de execução (KANDHAL, 1997):

- Reciclagem a frio (Cold planning);
- Reciclagem a frio in-situ (Cold in-place recycling);
- Reciclagem a quente (Hot recycling);

- Reciclagem a quente “in situ” (Hot in-place recycling); e
- Reciclagem de camadas do pavimento (Full depth reclamation).

O processo de reciclagem a frio envolve a remoção de toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, com redução do material a dimensões apropriadas para ser misturada a frio na construção de uma nova camada, onde poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. A mistura final poderá ser utilizada como camada de base, porém esta camada deverá ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de ser submetida à ação direta do tráfego (DNIT, 2006).

A reciclagem a frio in-situ reabilita o revestimento existente utilizando normalmente asfalto emulsionado sem ser aquecido para produzir uma nova camada asfáltica com características semelhantes a uma mistura de pré-misturada a frio (PMF). O processo consiste basicamente da extração de uma determinada profundidade do revestimento, adicionando-se emulsão asfáltica, aditivos, espalhando-a e compactando em seguida através de equipamentos apropriados. A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia normalmente entre 75 a 100 mm.

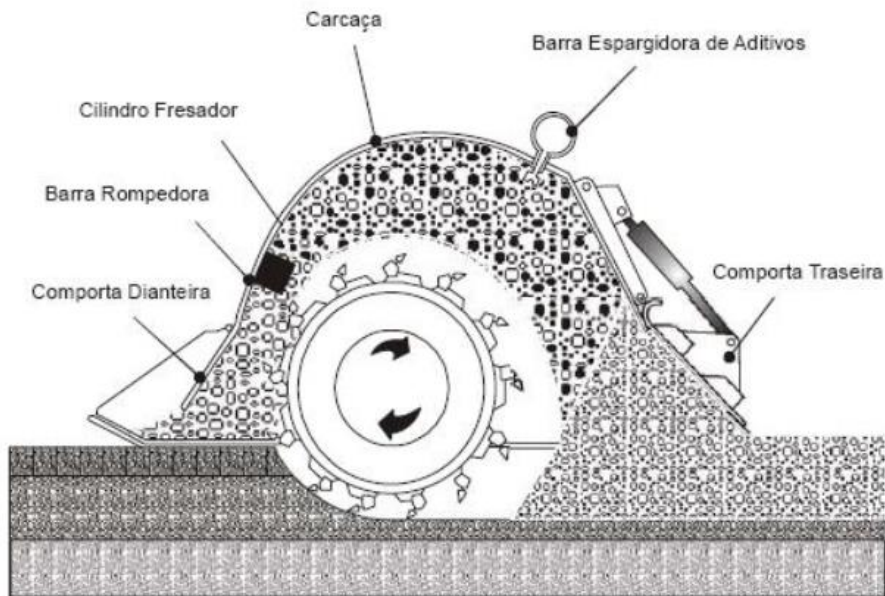
Segundo Fonseca (2009), o processo de reciclagem in situ é composto essencialmente por três operações:

- A exploração dos materiais granulares: representa a fresagem até uma profundidade determinada para recuperar o material granular do pavimento existente, a ser reutilizado na construção da nova camada;
- A mistura dos materiais: representa a mistura, a frio, do material desagregado no próprio local, onde podem ser adicionados a água (hidratação ou pré-molhagem), os ligantes (emulsão betuminosa, espuma de betume, cimento ou cal) e os agregados para eventual correção da distribuição dos tamanhos das partículas; e
- A compactação da mistura: refere-se ao adensamento do material por compactação e o nivelamento para obtenção de uma nova camada do pavimento.

Existem diversos melhoramentos recentes dos equipamentos utilizados para o serviço de reciclagem a frio in-situ. As fresadoras modificadas ou especialmente projetadas estão disponíveis para processar o material removido numa única passada (DNIT, 2006).

A figura 5 apresenta o processo de reciclagem a frio in-situ, como pode ser observado, ele inclui o corte até o greide desejado, a fragmentação do antigo pavimento, e possibilita a adição e mistura de aditivos.

Figura 5 - Dispositivo de reciclagem *in situ*.



Fonte – DNIT (2006).

A reciclagem a quente de pavimentos é um processo em que parte ou toda a estrutura do pavimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a quente no próprio local “*in situ*” ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. O produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento (DNIT, 2006).

A reciclagem a quente “*in situ*” é definida como um processo para correção de defeitos de superfície com o corte e fragmentação do antigo revestimento asfáltico, a mistura com agente rejuvenescedor, agregado virgem, material ou mistura asfáltica, e a posterior distribuição da mistura reciclada sobre o pavimento, sem a remoção do material reciclado do local de origem. A reciclagem pode ser realizada tanto como uma operação de passagem única, que associa a mistura reciclada com o material virgem, quanto como uma operação de passagem dupla, onde a mistura reciclada é recompactada seguida da aplicação de uma nova camada de mistura asfáltica (DNIT, 2006).

A reciclagem de camadas do pavimento é uma técnica que consiste na obtenção de uma nova camada de base ou sub-base estabilizada, através da adição de um novo material geralmente inserido no material fresado. Esses materiais podem ser: cal hidratada, cimento, agregados (miúdo e/ou graúdo), emulsões, agentes químicos (por exemplo, polímeros e fibras

sintéticas), etc. Estes aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo (ARAÚJO et al, 2001).

Os tipos de reciclagem podem ser distinguidos pelo local de produção da mistura, temperatura que a mistura é produzida, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de asfalto utilizado. Com os equipamentos disponíveis no mercado, as técnicas de reciclagem in situ apresentam vantagens sobre as técnicas de reciclagem em centrais. Dentre elas pode-se ressaltar o menor custo (uma vez que não é necessário realizar o transporte do material para uma central), redução do consumo energético e o menor desgaste das estradas existentes (uma vez que não são necessários os transportes entre o material e a usina) (FONSECA, 2007).

A Tabela 3 apresenta a classificação dos tipos de reciclagem mais comuns.

Tabela 3 - Tipos de reciclagem.

(continua)		
Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantêm as cotas do greide
	Com modificação	
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	“In situ”	A quente ou a frio
	Mista	Reciclagem “in situ” da base e aplicação de reciclagem a quente, processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com preaquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	BINDER
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	

Tabela 3 - Tipos de reciclagem.

Quanto aos materiais adicionados	Agregados	(conclusão) Correção granulométrica
	Cimento Portland e cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

Fonte – Adaptado de Bonfim (2007).

Pires (2014), conduziu um estudo para avaliar a estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos. Os materiais fresados utilizados na pesquisa foram oriundos da BR-290 e da ERS-509. A estabilização granulométrica foi realizada sendo determinado o teor de 70% de material fresado e 30% de agregado natural. Para ensaio de resistência à compressão simples foram moldados com diferentes teores de cimento Portland (CP-IV 32), sendo determinados os teores de 4,86% (BR-290) e 5,37% (ERS-569). A partir dos resultados obtidos foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de resiliência; sendo nestes substituído em massa o CP-IV 32 em 15, 30 e 50% por cinza de casca de arroz moída (CCA #325 e CCA #500), colocados em câmara úmida por 7, 28 e 160 dias. Ao final do estudo o autor concluiu que a estabilização granulométrica do fresado é de extrema importância, pois ensaios básicos de laboratório demonstram o crescimento de desempenho destas misturas em uma simples compactação adequada. A estabilização química com cimento Portland se mostrou eficaz, uma vez que o material fresado já é um material envelhecido e necessita de tratamento com outros materiais para sua melhor aplicação. A cinza de casca de arroz vem com o apelo ambiental, pela menor quantidade de utilização do cimento, e o reaproveitamento deste material oriundo da casca de arroz com grande potencial pozolânico. A substituição de cimento em 15% de CCA se mostrou uma alternativa interessante, uma vez que a alteração da resistência foi mínima.

A pesquisa feita por Fedrigo (2015), teve o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de misturas constituídas por fresado asfáltico, brita graduada e cimento, variando-se a porcentagem de fresado (20% e 50%), o teor de cimento (2%, 4% e 6%), a energia de compactação (Intermediária e Modificada) e o tempo de cura dos corpos de prova (3, 7 e 14 dias). Os resultados dos ensaios mostraram que todas as variáveis analisadas afetam significativamente a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão

diametral e o módulo de resiliência das misturas. O autor conclui que são obtidos elevados valores de resistência à compressão simples (1,61 MPa a 6,08 MPa), resistência à tração por compressão diametral (0,29 MPa a 1,00 MPa) e de módulo de resiliência (10390 MPa a 25719 MPa) com teores baixo (2%) e médio (4%) de cimento, sendo desnecessário e arriscado, pela elevada retração associada, o emprego de teor mais elevado (6%).

O estudo elaborado por Kleinert (2016) analisou os efeitos da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura em camadas recicladas com cimento, compactando-se os corpos de prova na energia Modificada. Os teores de cimento utilizados foram entre 1% e 7%, e porcentagens de fresado variando entre 8% e 92%. Os tempos de cura considerados foram de 3, 7 e 14 dias para os ensaios de comportamento mecânico. O autor verificou que todas as variáveis afetam as propriedades analisadas, sendo que o teor de cimento demonstrou maior efeito, sua adição melhora consideravelmente o comportamento das misturas empregadas. Foram alcançados resultados bastante elevados de resistência à compressão simples (1,00 MPa a 6,49 MPa) e resistência à tração na compressão diametral (0,17 MPa a 1,22 MPa).

2.5 PESQUISAS SOBRE RECICLAGEM EM CONCRETOS

Delwar et al. (1997) conduziram um estudo com o objetivo de introduzir o RAP no concreto plástico e verificar o comportamento da mistura quanto às suas características mecânicas. As pesquisas foram realizadas em laboratório com corpos de prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm (diâmetro x altura), os quais foram moldados utilizando 10 composições de agregados, variando de 0, 25, 50,75 e 100% de AG mantendo 100 de AF, e o mesmo para o inverso. Uma mistura padrão foi produzida com agregados naturais (areia e brita) e outras utilizando RAP fino (AF) e graúdo (AG). Agregado fino abaixo da peneira 4,8 mm e o material graúdo retido na peneira 4,8mm e passante na peneira 19,0 mm. Para cada mistura quatro amostras de concreto foram produzidas utilizando duas relações água/cimento (0,4 e 0,5).

Os autores observaram que quanto maior é a proporção de RAP na mistura, menor é a tensão de ruptura. O aumento na quantidade de RAP no concreto faz com que a rigidez do concreto diminua; resultados que também foram observados por Mathias, Sedran e Larrad (2004). Os resultados de curva tensão-deformação indicam que o concreto contendo maiores quantidades de RAP falha a níveis de deformação maiores indicando que o agregado fresado pode causar alguma ductilidade no concreto. A amostra padrão sempre teve valores de resistência à compressão maior que as amostras contendo qualquer quantidade de RAP. Estas amostras tiveram fraturas do tipo abruptas e cônicas com separação do CP caracterizada pelo

rompimento instantâneo da argamassa. As amostras com adição de RAP tiveram as fraturas mais lentas, os CPs cilíndricos não se separaram e continuaram sustentando carga após a fratura inicial.

Delwar et al.(1997) e Huang et al.(2005) também verificaram que a fratura nas amostras contendo RAP não é abrupta, ou seja, não é rápida, bem como, que o concreto com RAP experimentou uma melhora na tenacidade, ductilidade e comportamento elástico. Huang et al. (2005) enfatizam que no concreto produzido com RAP, o ligante existente forma um filme fino na interface da argamassa de cimento com o agregado, a qual pode impedir a propagação das trincas nos agregados.

Os autores indicam que a trinca se desenvolve ao redor do agregado ao invés de passar pelo mesmo, durante a qual mais energia pode ser dissipada. O objetivo do estudo foi explorar o potencial do uso de RAP no concreto de cimento Portland (CCP) para aumentar a tenacidade e reduzir as chances de ruptura frágil. Foram utilizados dois tipos de RAP (fino e graúdo) para substituir os agregados da mistura padrão. Nesse estudo, o RAP foi preparado em laboratório tendo um filme de asfalto em torno do agregado da ordem de 8 μm . Os tempos de cura empregados foram de 3, 7, 14 e 28 dias para realização de testes para verificação das propriedades mecânicas das misturas. A preparação de quatro misturas foi realizada para investigar os diferentes efeitos da cobertura asfáltica nos agregados finos e graúdos.

Os resultados mostraram que o abatimento do concreto produzido somente com RAP graúdo ou fino foi mais baixo que o concreto padrão. Esse fato pode estar relacionado à elevada viscosidade do ligante asfáltico. O abatimento do concreto confeccionado com ambos os fresados (fino e graúdo) foi mais alto que o da mistura padrão. Quanto às propriedades do concreto endurecido, houve uma diminuição na resistência à compressão e à tração para as amostras com ambos os fresados. A presença do ligante asfáltico pode ter induzido uma concentração de tensões e causado microfissuras dentro da matriz de concreto. Porém, a taxa de redução da resistência à tração para misturas com RAP foi significativamente menor que aquela para a resistência à compressão.

Hossiney et al. (2008) também trabalharam com a possibilidade de uso de RAP em concreto para aplicação em pavimento de concreto. O concreto foi produzido em laboratório e suas propriedades foram avaliadas. Análises com elementos finitos foram realizadas para determinar como concretos contendo diferentes quantidades de RAP se comportariam se fossem empregados em um pavimento de concreto típico do Estado da Flórida. Os resultados deste estudo mostraram que as resistências à compressão, à tração e à flexão, bem como o módulo de elasticidade diminuíram com o aumento da porcentagem de RAP, a retração por

secagem parece diminuir com o aumento da quantidade de RAP, a tensão máxima no pavimento diminuiu com o aumento na quantidade de RAP, devido à queda no módulo de elasticidade, os vazios de ar aumentam com o aumento da quantidade de RAP, o coeficiente de expansão térmica aparentemente não foi afetado com a introdução do RAP.

Na França, Mathias, Sedran & Larrard (2004) buscaram inovar o uso do RAP com o intuito de promover maior utilidade deste material que é produzido em grande quantidade, em torno de 2 milhões de toneladas por ano na França, e consideraram o seu uso em concreto vibrado e em concreto compactado com rolo. Assim como em outros estudos já citados, observou-se a diminuição na resistência à tração e no módulo de elasticidade da mistura quando o RAP é incorporado. Quanto ao comportamento à fadiga, observaram que a introdução do RAP no concreto leva a uma diminuição no σ_6 , (tensão medida nos ensaios de fadiga) devido à queda nos valores de resistência à tração na flexão. Por outro lado, o concreto com RAP apresentou menor dispersão no fator SN (dado pela análise estatística de todas as amostras testadas).

Assim como outros autores, Mathias, Sedran & Larrard (2004) concluíram que é possível a incorporação do RAP em concreto para pavimentos. Mesmo aumentando a espessura das camadas quando utilizado o RAP, ainda assim se torna uma opção técnica e economicamente viável.

No Irã os autores Modarres e Hosseini (2014) estudaram os efeitos da cinza da casca de arroz (CCA), nas propriedades mecânicas do CCR composto por agregados naturais e RAP. As misturas foram produzidas com substituição parcial do cimento por CCA em 3 e 5%, foram consideradas 4 composições de misturas, 100% RAP, 100% agregado natural, RAP graúdo + agregado natural miúdo, agregado natural graúdo + RAP miúdo. Os ensaios realizados foram, RCS e RTF, as idades de cura foram 7, 28 e 160 dias, conforme os autores a adição de CCA resultou em um maior teor de umidade e uma menor massa específica aparente seca, já a adição de RAP de diferentes dimensões, reduziu o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca. Os autores concluem que a vida de fadiga das misturas contendo RAP é menor que a da mistura convencional. Além disso, substituir o agregado graúdo por RAP leva a uma maior vida de fadiga do que com o agregado miúdo.

Ainda no Irã, Fakhri e Amoosoltani (2017) avaliaram o efeito de RAP e de borracha de pneu nas propriedades mecânicas do CCR. Os autores investigaram o efeito da substituição parcial de agregados por esses materiais, na energia absorvida e na resistência. As misturas tiveram substituições de 25 a 100% de RAP e 5 a 25% de borracha moída. Os resultados revelaram que as resistências à compressão e à tração das misturas de CCR são ligeiramente

(cerca de 5%) melhoradas usando 5% de teor de borracha. Em contraste, uma grande diminuição da resistência à compressão e tração das misturas quando se aumenta o conteúdo de RAP. No entanto, os autores relataram que esses testes laboratoriais convencionais não podiam fornecer um critério apropriado para determinar a combinação de mistura ideal. Portanto, um teste secundário foi conduzido para medir a energia absorvida e a dureza das misturas, que são critérios promissores para as misturas de CCR com a combinação de resíduos. Os resultados mostram uma tendência crescente de dureza e absorção de energia de misturas incorporados a resíduos. Assim, o conceito de absorção de energia foi destacado através do desenvolvimento de várias relações usando Análise de Variância (ANOVA) e análise de regressão. Os resultados da regressão indicam que a incorporação de até 10% de borracha e 50% RAP poderia ser rentável e benéfica para prolongar a vida do pavimento através do aumento da resistência e absorção de energia das misturas.

Settari et al. (2015) conduziram um estudo para avaliar os efeitos do RAP na performance do CCR. Os autores avaliaram os efeitos de vários tamanhos de RAP como substituto do agregado natural graúdo e miúdo nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto compactado por rolo. As propriedades mecânicas e durabilidade do CCR com materiais RAP são analisados e comparados com o CCR com 100% de agregado natural. Os resultados experimentais mostraram que é possível fabricar CCR com um máximo de 50% de materiais RAP. Além disso, pode ser mais eficiente para o meio ambiente valorizar esse tipo de resíduos em concreto, pois isso ajuda a remover em geral algumas partes de resíduos e protege o meio ambiente.

A pesquisa desenvolvida por Trichês et al. (2013) é bastante ampla e compreende o estudo em três etapas distintas. Com relação à avaliação do comportamento mecânico de misturas recicladas com cimento, verificou-se, de maneira geral, que a adição do agente estabilizador gera ganhos de resistência e rigidez nas composições estudadas. Além disso, o emprego de maiores tempos de cura também apresentou melhoras no comportamento mecânico, considerando as misturas avaliadas nas três etapas.

Sachet (2012), conduziu um estudo sobre misturas de CCR com adição de fresado, o autor estudou seis misturas, duas de referência, uma com areia natural e outra com areia industrial, as outras quatro misturas tiveram um tipo de agregado substituído por fresado, a primeira teve 100% da areia industrial substituída por fresado, a segunda teve o pedrisco substituído, a terceira teve a brita 1 substituída e a quarta teve uma substituição de 50% da faixa total de agregados, as porcentagens de fresado utilizado ficaram de 37%, 39%, 24% e 50% respectivamente. O fresado utilizado pelo autor foi oriundo da reciclagem da Via Anchieta,

quilômetro 39, sentido Litoral - São Paulo. A reciclagem foi realizada no revestimento asfáltico com espessura de 60 mm. O consumo de cimento utilizado foi 100 kg/m^3 para todas as misturas com cimento tipo CPIII-40-RS. Os ensaios de compressão diametral e tração na flexão mostraram que a incorporação de RAP, em qualquer fração, diminuiu bruscamente a resistência mecânica dos corpos de prova, em relação ao CCR de referência, sendo a queda mais acentuada no caso da resistência à compressão.

O mesmo autor concluiu que embora a incorporação do RAP na mistura de CCR diminua a resistência das misturas e afete todos os parâmetros mecânicos, ainda assim é um material que pode ser utilizado como base e sub-base de pavimentos, pois alcançou parâmetros mecânicos que viabilizam seu uso.

Já os autores Singh, Ransinchung e Kumar (2017) afirmam que a presença de filme de asfalto em torno dos agregados RAP é o principal fator que reduz as propriedades do concreto com RAP, e apresentam uma nova técnica de Abrasão e Atrito (AB & AT) para melhorar a qualidade do RAP removendo as camadas contaminantes de poeira e perfurando o filme de asfalto aderindo a agregados RAP. Os autores avaliaram o efeito da incorporação de RAP sujo (DRAP), RAP lavado (WRAP) e RAP tratado com AB & AT, nas propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade do concreto. Verificou-se que as propriedades mecânicas dos agregados RAP aumentaram significativamente no processamento com o método AB & AT. A beneficiação do RAP pelo método AB & AT aumentou a resistência à compressão do concreto em 9,74% e 12,71%, dividiu a tração em 2,66% e 12,21% e a resistência à flexão em 6,05% e 8,55%, em comparação com o concreto WRAP e DRAP inclusive. Incorporação de RAP na mistura de concreto melhorou a capacidade de trabalho e a coesão. As propriedades de durabilidade do concreto, como a absorção de água, a taxa inicial de absorção de água, os vazios permeáveis totais e o coeficiente de absorção de água foram observados como sendo reduzidos para o concreto inclusivo RAP.

Fedrico (2012) estudou o comportamento do CCR para ser utilizado como base para pavimentos. No estudo foram utilizados dois consumos de cimento, 80 kg/m^3 e 200 kg/m^3 . As energias de compactação foram equivalentes às energias dos ensaios de Proctor normal e modificado. O cimento utilizado foi o CP-V ARI e como agregados foram utilizados: pedra britada (nº 0 - $\frac{1}{2}$ " e nº 1 - $\frac{3}{4}$ ") e areia artificial. O aumento da energia de compactação se mostrou mais eficiente para o teor de cimento de 80 kg/m^3 , multiplicando por cerca de 4 vezes o valor da resistência à compressão e 3 vezes o valor da resistência à tração. Isto mostra que para baixos níveis de cimentação, o efeito do aumento da energia de compactação é de grande importância e que quando se tem quantidades maiores de cimento, o efeito da compactação não

é observado com mais intensidade. O aumento na resistência causado pelo acréscimo do teor de cimento é maior que o causado pela mudança de energia de compactação (redução da porosidade da mistura), podendo ser explicado pela grande diferença entre os dois teores utilizados, sendo o maior deles 2,5 vezes mais elevado que o menor.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo descrevem-se as diferentes etapas realizadas para alcançar os resultados desejados na pesquisa. Para isso, são apresentados a seguir, o planejamento da pesquisa, os materiais utilizados, e os métodos adotados para dosagem/moldagem e execução dos ensaios.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A presente dissertação é parte integrante de uma pesquisa global a respeito das propriedades mecânicas do concreto compactado com rolo com incorporação de material fresado asfáltico para base de pavimentos, como relatado no item 1. O programa experimental proposto para essa dissertação foi elaborado objetivando avaliar a substituição parcial de agregado graúdo por fresado asfáltico nas propriedades mecânicas do CCR, entre elas: resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e resistência à tração na flexão (RTF). O restante das propriedades do CCR, como o módulo de elasticidade e módulo de resiliência foi abordado por outro pesquisador do estudo.

Foram definidas como variáveis fixas: o consumo de cimento, a porcentagem de fresado e a energia de compactação. Foram adotados dois consumos de cimento um de 100 kg/m^3 e outro de 150 kg/m^3 , situando-se entre os limites recomendados por normas e bibliografias. Também foram definidas duas porcentagens de fresado para substituição do agregado graúdo, em massa: 10% e 30%, por serem valores com representatividade, ou seja, é possível verificar alguma modificação na estrutura da mistura e ao mesmo tempo, se mantém um alto teor de agregado natural, tentando evitar propriedades mecânicas muito baixas.

Por fim, definiu-se pela utilização da energia Intermediária do ensaio Proctor para compactação de todas as misturas, seguindo as recomendações dos autores Trichês (1993) e Hurtado Diaz (1993), pois as misturas estudadas tem o propósito de serem utilizadas em camadas intermediárias de pavimentos (bases).

O tempo de cura dos CPs foi de 7 e 28 dias para todos os ensaios, conforme estipulado pelas normas de cada ensaio.

A nomenclatura usada para a identificação das misturas ao longo do documento obedece ao consumo de cimento e à porcentagem de fresado. Assim, os corpos de prova receberam um código do tipo CCR CC-RAP. Onde CC representa o consumo de cimento e RAP, o teor de fresado. Assim, uma mistura CCR 100-0, por exemplo, corresponde à mistura com 100 kg/m^3 de consumo de cimento e 0% de fresado, tornando-se então a mistura de referência. Essa

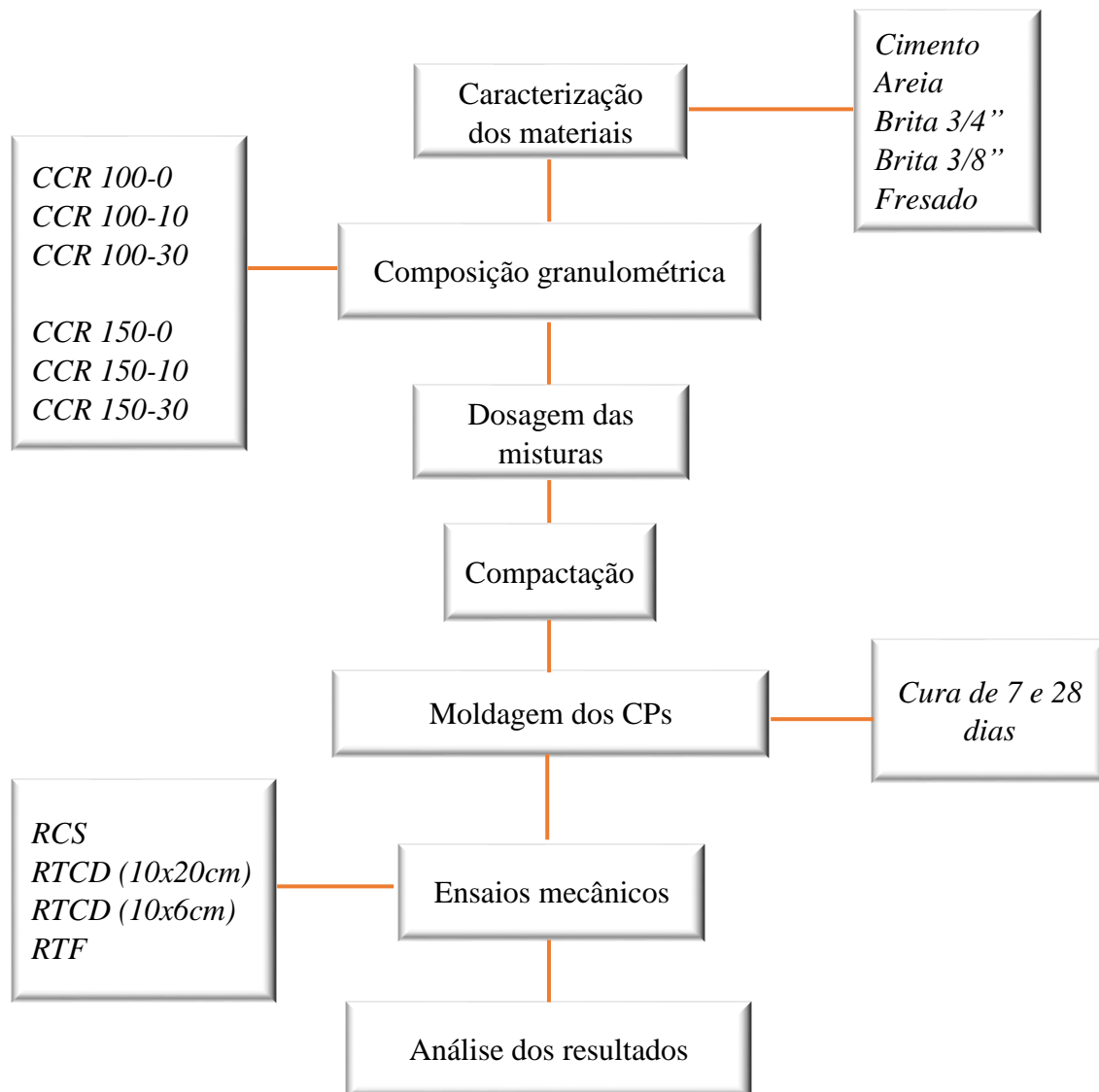
identificação será utilizada a partir deste capítulo. A Tabela 4 mostra os ensaios e a quantidade de amostras moldadas, para cada mistura, assim como a nomenclatura adotada.

A Figura 6 demonstra, esquematicamente, o programa experimental empregado para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados. De modo a facilitar o entendimento serão adotadas as seguintes abreviações: RCS – Resistência à compressão simples, RTCD – Resistência à tração por compressão diametral (10 cm x 20 cm), RTCD – Resistência à tração por compressão diametral (10 cm x 6 cm) e RTF – Resistência à tração na flexão.

Tabela 4 - Quantidades de CPs para cada ensaio.

Nomenclatura	Consumo de cimento kg/m ³	Subst. Fresado %	Dias de cura	RCS	RTCD (10x20 cm)	RTCD (10x6 cm)	RTF
CCR 100-0	100	0	7	5	5	5	5
			28	5	5	5	5
10		7	5	5	5	5	
		28	5	5	5	5	
CCR 100-30		30	7	5	5	5	5
			28	5	5	5	5
CCR 150-0	150	0	7	5	5	5	5
			28	5	5	5	5
10		7	5	5	5	5	
		28	5	5	5	5	
CCR 150-30		30	7	5	5	5	5
			28	5	5	5	5
Total de CPs				240			

Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



3.2 MATERIAIS

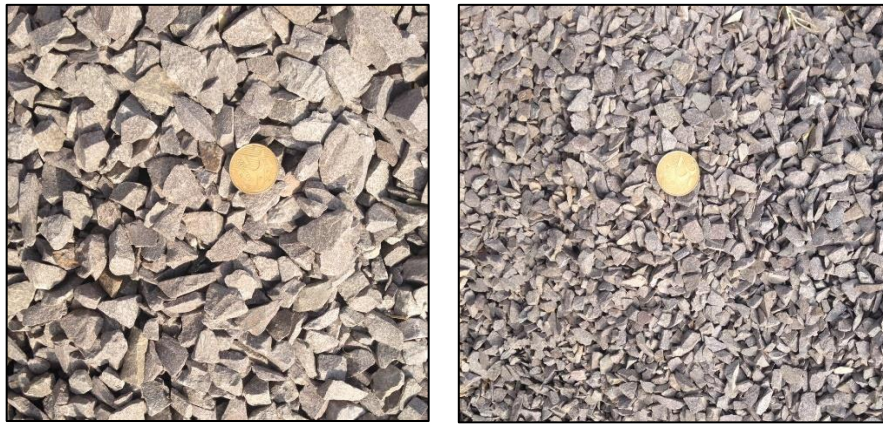
A presente pesquisa buscou estudar o comportamento de seis misturas de CCR, para serem utilizadas como estrutura de base de pavimentos. Os materiais utilizados para formar estas misturas de CCR são especificados neste item. Sendo eles: água, cimento, areia, brita 3/4'', brita 3/8'' e fresado.

3.2.1 Agregados virgens

Os materiais granulares graúdos utilizados na pesquisa foram obtidos de um complexo de britagem de uma empresa, situada em Itaara – RS. Trata-se de um agregado basáltico largamente utilizado em obras de pavimentação, encontrado entre as encostas da Serra Geral e a Depressão Central Gaúcha.

Neste estudo os materiais britados utilizados foram: brita 3/4” e brita 3/8”, conforme ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Materiais britados virgens



O agregado miúdo utilizado foi a areia natural, da região central do estado. Apresenta-se na Figura 8, o aspecto visual e granulométrico da areia.

Figura 8 - Areia utilizada na pesquisa



As análises granulométricas dos materiais foram realizadas conforme a norma DNER-ME 083/98, sendo apresentada na Tabela 5 e plotadas as curvas granulométricas na Figura 9.

A caracterização em termos das massas específicas reais, aparentes e absorção (DNER-ME 195/97) e desgaste à abrasão (DNER-ME 035/98) estão expostas na Tabela 6.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens

Peneira	Abertura (mm)	% Passante		
		Brita 3/4"	Brita 3/8"	Areia
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	96,78	100,00	100,00
1/2"	12,7	11,88	100,00	100,00
3/8"	9,5	1,62	99,85	100,00
1/4"	6,3	0,05	64,50	99,95
n 4	4,8	0,03	44,43	99,94
n 8	2,4	0,02	10,50	99,55
n 10	2	0,02	6,79	98,40
n 16	1,2	0,02	2,00	97,56
n 30	0,6	0,02	1,50	85,77
n 40	0,42	0,02	1,36	66,50
n 50	0,3	0,02	0,70	48,15
n 80	0,18	0,02	0,53	20,00
n 100	0,15	0,01	0,30	15,02
n 200	0,075	0,00	0,00	4,49

Figura 9 - Curvas granulométricas dos agregados virgens

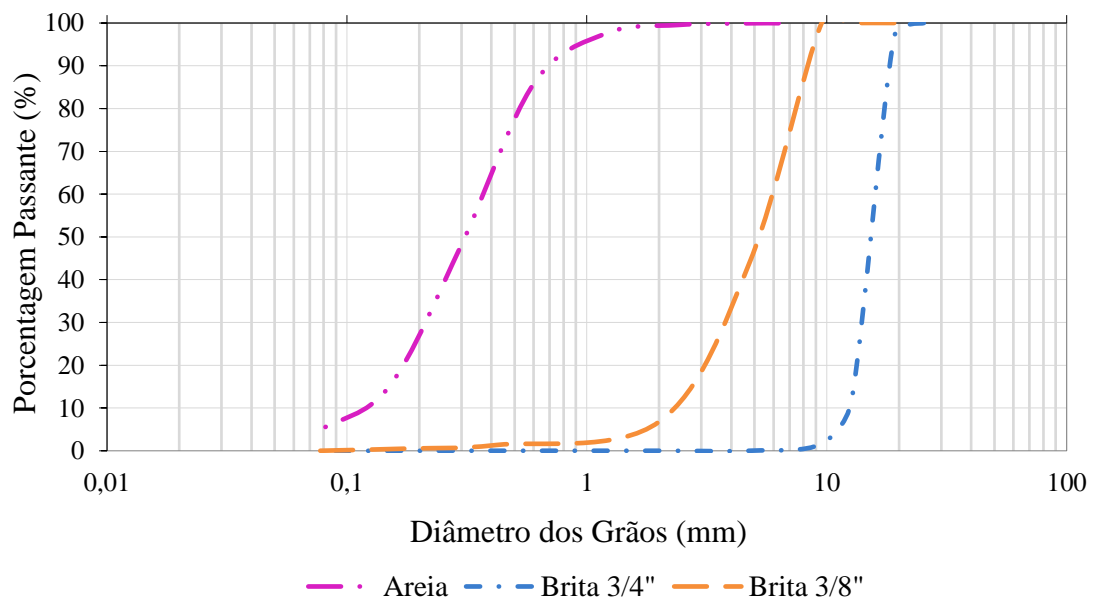


Tabela 6 - Caracterização dos agregados britados virgens

	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Areia
Massa específica (g/cm ³)	2,501	2,488	2,633
Absorção (%)	2,08	2,58	-
Desgaste à abrasão (%)	10,18	15,55	-

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-F 32 cedido pela empresa Prantomix da cidade de Santa Maria. O tipo de cimento foi escolhido por ser um produto com características apropriadas para emprego em pavimentação.

A massa específica do cimento foi determinada de acordo com as prescrições da norma NBR NM 23/2001. O resultado do ensaio foi de uma média de 3,085 g/cm³.

3.2.3 Material fresado asfáltico

O fresado asfáltico utilizado na pesquisa é proveniente da fresagem na BR - 287 localizado nas proximidades da cidade de Santa Maria/RS. A máquina que realizou os serviços de retirada do revestimento asfáltico que tinha uma espessura de 40 mm é uma Fresadora modelo PM 102 – CATERPILLAR. Na Figura 10 apresenta-se uma amostra do material.

Figura 10 - Material fresado asfáltico utilizado na pesquisa.



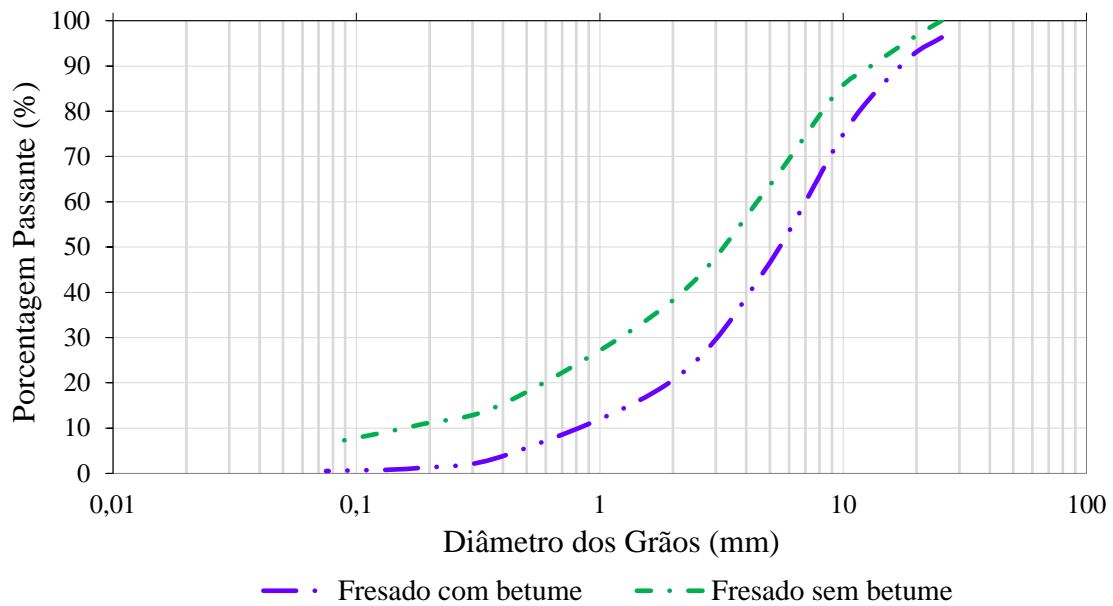
Todas as amostras foram separadas e secas ao ar, para os ensaios de caracterização do fresado, entre eles, análise granulométrica, determinação do teor de betume, análise granulométrica após extração de betume e densidade máxima teórica.

Para realizar a caracterização granulométrica do fresado foram separadas duas amostras. Seguindo a norma DNER-ME 083/98. Importante salientar que para todas as misturas de CCR utilizou-se apenas o material fresado passante na peneira #1”, sendo descartado o material maior que 19,1mm. Para a análise granulométrica do fresado sem betume foi realizado a extração de betume, pelo equipamento Rotarex, que será descrito mais adiante, gerando-se a curva granulométrica do fresado sem betume. A Tabela 7 apresenta os valores da análise granulométrica do fresado com e sem betume, assim como na Figura 11 onde estão plotadas as curvas.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica do material fresado com e sem betume.

Peneira	Abertura (mm)	% Passante	
		Fresado com betume	Fresado sem betume
1”	25,4	96,3	100,000
3/4”	19,1	92,2	96,019
1/2”	12,7	82,5	89,601
3/8”	9,5	72,9	84,479
n 4	4,8	45,2	62,432
n 10	2,0	20,6	38,257
n 40	0,42	4,2	15,900
n 80	0,18	1,2	10,698
n 200	0,075	0,5	6,510

Figura 11 - Curva granulométrica do material fresado, com e sem betume.



Para a determinação do teor de betume do material fresado foi utilizado o aparelho Rotarex elétrico, conforme a norma DNER - ME 053/94. A extração foi feita em duas amostras, obtendo-se uma média de 6,20%, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Teor de betume do fresado.

	Amostra 1	Amostra 2
Teor de Betume (%)	6,17	6,22
Teor médio de Betume (%)	6,20	

Foi determinada também a Densidade Máxima Medida (DMM) pelo método Rice, através do ensaio baseado na norma ABNT/NBR 15619:2012 Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. O ensaio foi realizado em duas amostras, apresentando-se os resultados na Tabela 9.

Tabela 9 - Densidade máxima medida.

	Amostra 1	Amostra 2
DMM (g/cm ³)	2,431	2,436
DMM médio (g/cm ³)	2,433	

3.2.4 Água

A água de amassamento utilizada foi proveniente da Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN – da cidade de Santa Maria e, assim sendo, presume-se como satisfatórias suas características e isenção de substâncias prejudiciais ao processo de pega e endurecimento do concreto.

3.3 MÉTODOS LABORATORIAIS

Após a coleta dos materiais e sua caracterização, deu-se início a fase dos procedimentos laboratoriais, entre eles, o enquadramento da composição granulométrica das misturas, o processo de dosagem, a definição das umidades ótimas através da compactação e por fim a moldagem e ensaios mecânicos realizados em todos os CPs.

3.3.1 Definição da distribuição granulométrica das misturas

A primeira consideração a ser analisada para a seleção da distribuição granulométrica é quanto ao tipo de aplicação do CCR no pavimento. Para revestimentos, a distribuição granulométrica deve comportar grãos menores com o objetivo de propiciar uma textura superficial mais “fechada”, mais resistente ao efeito de abrasão e que evite ou minimize a segregação dos materiais. Para bases, a mistura pode apresentar consumo menor de cimento, porém, deverá atender às resistências mecânicas definidas em projeto. Além disso, a questão da textura superficial é bem mais maleável posto que o pavimento tenha ainda uma camada superior de revestimento.

A granulometria é estudada para se obter o menor índice de vazios possível uma vez que tal critério colabora para um ganho de resistência maior (ganho de massa específica para a mistura compactada) e menor consumo de cimento, o que se trata de um critério de economia. De maneira geral, a curva granulométrica do CCR deve ser ajustada em laboratório escolhendo-se a que melhor atenda às especificações técnicas desejadas no projeto de pavimentação.

A otimização granulométrica do CCR se deu pela adequação dos materiais granulares utilizados, enquadrando-os dentro dos limites superior e inferior da curva granulométrica proposta por Pittman e Ragan (1998) para emprego em bases de pavimentos, conforme apresentado no item 2.1.4.

A proporção dos materiais usada para desenvolver a composição granulométrica foi feita por tentativas até conseguir uma curva de referência que estivesse perto da média entre os limites recomendados. Para tanto, foi tomado como referência as misturas CCR 100-0 e CCR 150-0, para as demais misturas, foram substituídas a fração de agregado graúdo em peso, assim sendo as proporções de materiais estão apresentadas na Tabela 10, e as composições granulométricas nas Figuras 12 a 14.

Tabela 10 - Proporções das misturas

Mistura	Brita 3/4" (%)	Brita 3/8" (%)	Areia (%)	Fresado (%)
CCR 100-0	24	39	37	0
CCR 150-0	24	39	37	0
CCR 100-10	19	34	37	10
CCR 150-10	19	34	37	10
CCR 100-30	9	24	37	30
CCR 150-30	9	24	37	30

Figura 12 - Composição granulométrica adotada para o CCR referência

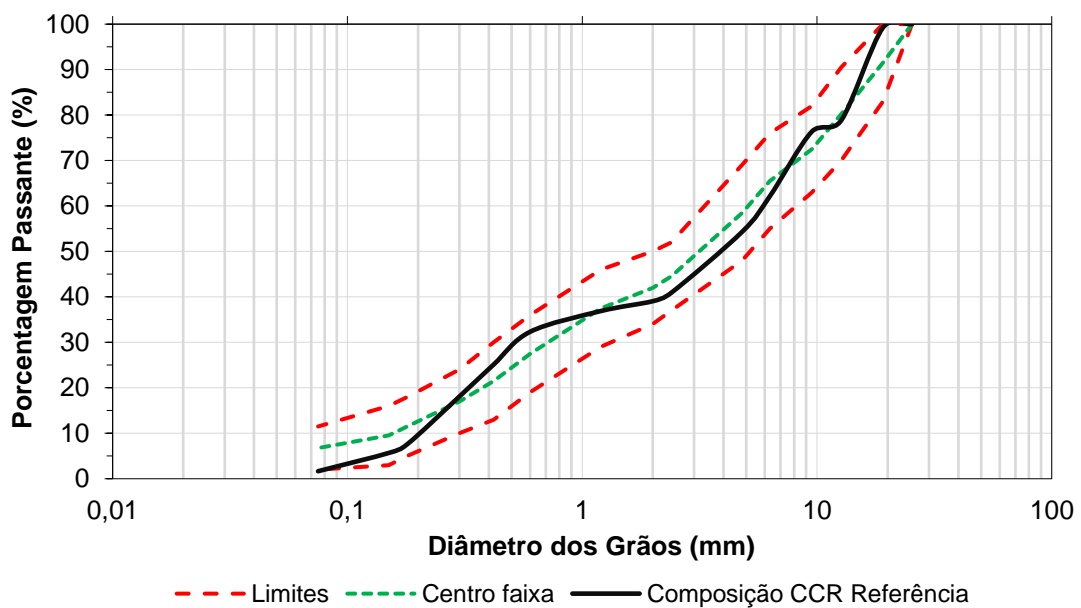


Figura 13 - Composição granulométrica adotada para o CCR com 10% de fresado

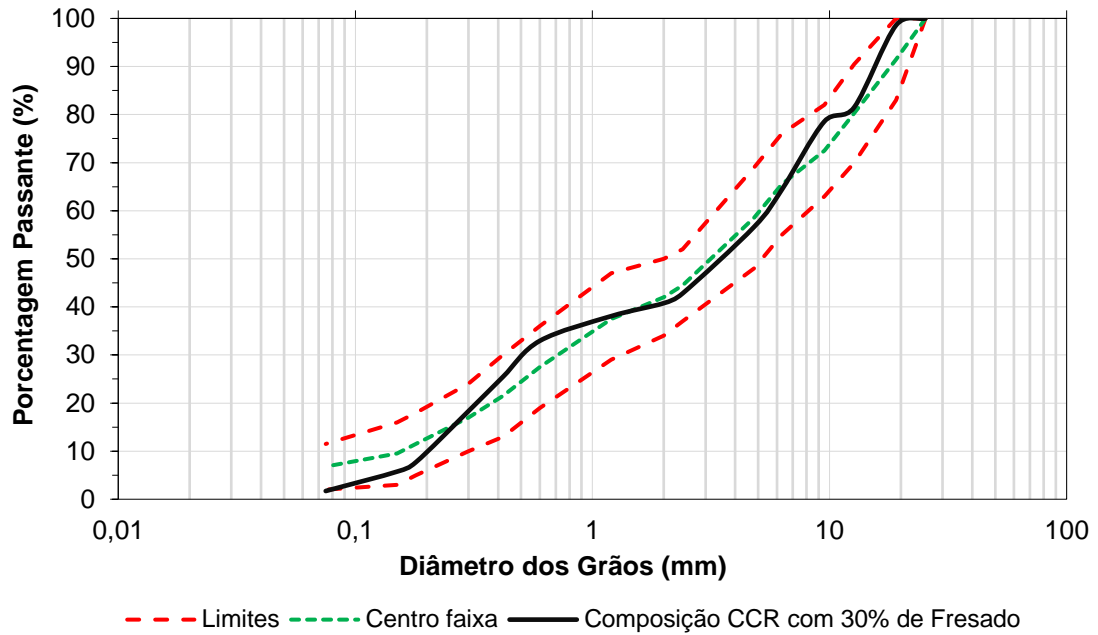
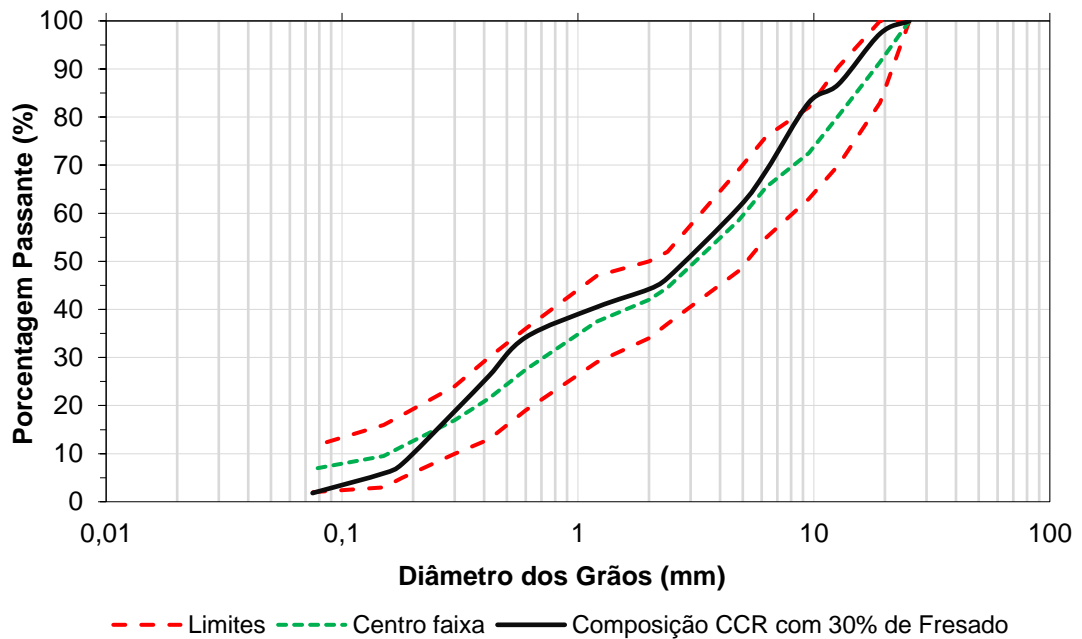


Figura 14 - Composição granulométrica adotada para o CCR com 30% de fresado



3.3.2 Dosagem das misturas de CCR

Para o cálculo do traço das misturas utilizou-se a Equação 1 descrita no item 2.1.4, a qual é recomendada por Trichês (1993). Após definida a composição granulométrica e o consumo de cimento a quantidade de agregados total por quantidade de cimento é calculada.

Para um mesmo consumo de cimento, variando-se o teor de umidade, têm-se diferentes quantidades “m” de agregado total (Equação 3). É possível então, através de um ensaio de compactação se determinar o teor de umidade que fornece a máxima massa específica aparente seca da mistura, então neste caso o teor de umidade foi fixado em 6,5% que foi denominado através de conclusões de outros autores, que dizem que a umidade ótima de compactação é em torno desse valor.

Sendo assim tem-se:

$$100 = \frac{1000 - 50}{\frac{1}{3,085} + \frac{m}{2,543} + \frac{6,5(1 + m)}{100}} \quad (3)$$

$$m = 19,88 \text{ kg}$$

Onde:

CC= Consumo de cimento da mistura: 100kg/m³;

V= Volume de vazios na mistura igual a 5%, o que representa 50 litros em 1m³ de CCR.

m= Quantidade de agregados total por quantidade de cimento, em 1 m³ de CCR;

h= Teor de umidade da mistura: 6,5 %;

γ_c= Massa específica do cimento: 3,085kg/m³;

γ_a= Massa específica do agregado total: 2,543kg/m³.

Então para essa mistura composta por um consumo de 100kg/m³ e teor de umidade de 6,5% o traço é: 1: 4,77 : 7,75 : 7,36 (cimento: brita 3/4” (24%): brita 3/8” (39%): areia (37%)).

Para facilitar as dosagens durante o trabalho experimental, criou-se a planilha de cálculo ilustrada na Tabela 11 que em função da Equação 1, calcula os diferentes valores de “m” para os diferentes consumos de cimento e teores de umidade para confecção das curvas de compactações. Esta planilha também foi utilizada quando do cálculo dos traços unitários para as moldagens definitivas após obtenção dos teores ótimos de umidade para cada CCR avaliado. A mesma já fornece as quantidades suficientes de materiais constituintes do CCR, para produção do traço experimental em laboratório para um dado volume de CCR produzido.

Tabela 11 - Planilha criada para cálculo do traço unitário do CCR em função do consumo de cimento desejado

Massa Específica dos Materiais (Kg/dm ³)		Porcentagem de Agregados Mistura (%)	
Areia	2,633	37	
Brita 3/4"	2,501	24	
Brita 3/8"	2,488	39	
Fresado	2,433	0	
Cimento	3,085	Massa Específica da Mistura (kg/dm ³)	
Volume de Vazios (L)	50		
Umidade (%)	6,5	2,543	
Consumo de Cimento (kg/m ³)	100		
Material por unidade de cimento	19,88	kg	

Mistura (kg/m ³)	Umidade (%)	m (kg)	Traço unitário				
			Cimento	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Areia	Fresado
				24 (%)	39 (%)	37 (%)	0 (%)
100	6,5	19,88	1	4,77	7,75	7,36	0
150	6,5	12,97	1	3,11	5,06	4,80	0

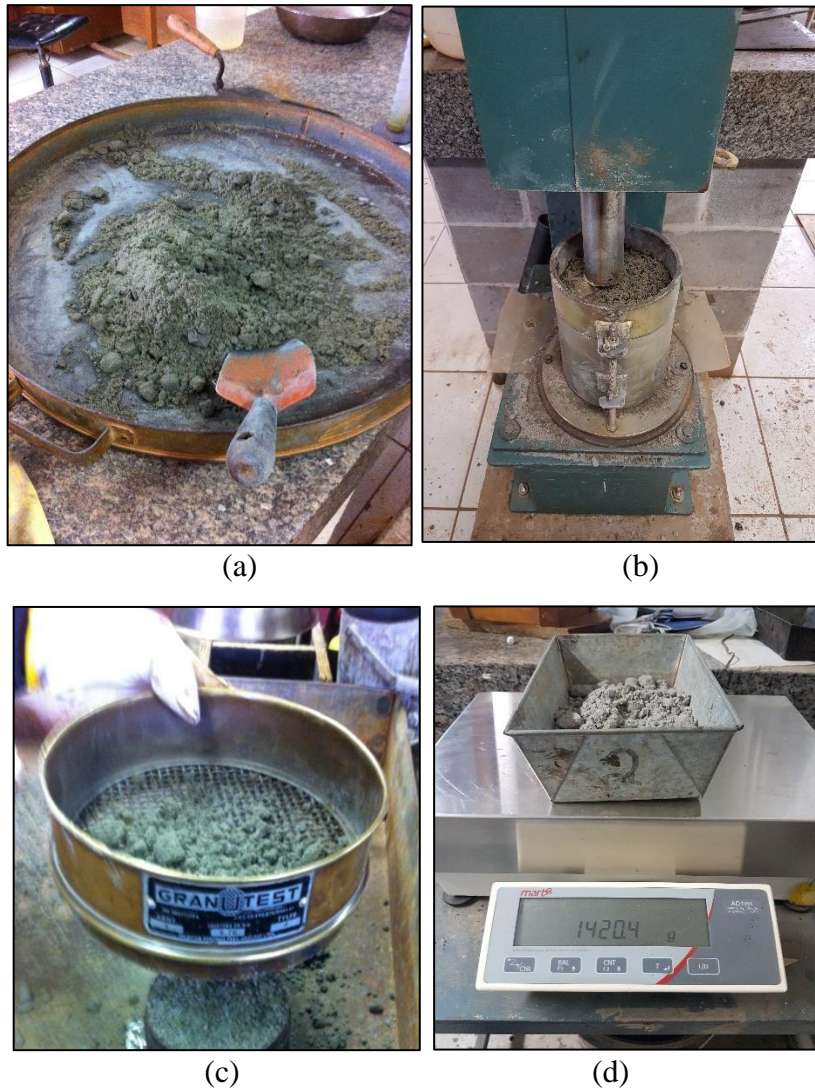
3.3.3 Ensaio de compactação

Os teores de umidade ótimo para cada mistura foram obtidos através do ensaio de compactação, seguindo os procedimentos da norma NBR 7182, utilizando-se moldes cilíndricos de 15cm x 30cm, a energia de compactação adotada foi a intermediária, como comentado no item 3.1, as misturas foram compactadas em 5 camadas com 65 golpes cada uma, por um compactador mecanizado.

Para cada mistura os materiais foram pesados separadamente, após, os agregados eram misturados manualmente em uma forma metálica, com auxílio de espátulas. Em primeiro lugar eram misturados os agregados graúdos, com parte da água a ser utilizada, em seguida era acrescido o material fino juntamente com o cimento e o restante da água, até completa homogeneidade. Como já definido anteriormente os consumos de cimento utilizados foram de 100 e 150kg/m³, a quantidade de água variou de 4,5 a 8,5%. A Figura 15 mostra detalhadamente a sequência dos procedimentos e medidas de controle adotados, tais como: a) homogeneidade

da mistura, b) altura de cada camada compactada, c) peneiramento sobre a última camada pela abertura 4,8mm e arrasamento da superfície e d) retirada de amostras para verificação da umidade.

Figura 15 - Procedimentos do ensaio de compactação



Ao fim da compactação o CP era pesado para determinar o peso da amostra compactada. Também foram retiradas duas amostras, pesadas e colocadas em estufa durante 24 horas, para a verificação da umidade, a partir destes resultados foram plotadas as curvas de compactação com as massas específicas aparentes secas e suas umidades, para definição da umidade ótima.

3.3.4 Moldagem dos CPs

Para dar segmento as etapas da pesquisa, neste item estão descritos todos os procedimentos adotados para a confecção dos CPs para posterior avaliação mecânica. Depois de efetuar a dosagem e descobrir os traços de cada mistura, todos os agregados naturais foram lavados e secos em estufa, para que não existisse nenhuma impureza que pudesse prejudicar na moldagem ou cura dos CPs. Já em relação ao material fresado, efetuou-se a retirada das partículas maiores que 19,1mm, pois como definido anteriormente a dimensão máxima dos agregados não poderia ultrapassar esse tamanho. Realizou-se um procedimento padrão de secagem desse material, o qual foi deixado por 4 horas, na estufa, a 60°C. Esse processo foi realizado antes de o material ser utilizado nas moldagens, para fins de eliminar qualquer umidade.

A mistura do concreto foi realizada em betoneira de 30 litros, Figura 16, procurando padronizar os procedimentos, os primeiros materiais a serem introduzidos na betoneira foram os agregados graúdos, bem como 1/3 da água de amassamento, após um tempo de mistura adicionou-se a areia e mais 1/3 da água, após mais alguns minutos foi acrescentado o cimento e o restante da água e misturado tudo por dois minutos (Figura 17), então efetuava-se uma inspeção visual para checar se estava bem homogêneo.

Figura 16 - Betoneira utilizada para mistura



Figura 17 - Mistura final do CCR fresco



Os moldes empregados para a moldagem foram: prismático – (10 x 10 x 40 cm) e cilíndrico – (10 cm x 20 cm), sendo confeccionados 5 exemplares por tipo de corpo de prova.

Antes de começar a moldagem cada molde recebeu uma película de desmoldante, para facilitar a retirada do CP após da cura (Figura 18).

Com a mistura pronta na betoneira, aferiu-se a quantidade de material necessária para cada camada e compactou-se até alcançar a altura desejada, como os moldes são de dimensões reduzidas foi preciso calcular o número de golpes através da Equação 2, apresentada no item 2.1.6. Utilizando um soquete com peso de 4,536 kg com altura de queda 45,7 cm, e sabendo que a energia potencial é de 12,7 kgf.cm.cm³ é possível então achar o número de golpes necessários para cada uma das 3 camadas através da Equação 4. Para o molde cilíndrico de 10 x 20 cm, tem-se:

$$E_p = \frac{P \cdot h \cdot n_g \cdot n_c}{V} =$$

$$12,7 = \frac{4,536 \times 45,7 \times n_g \times 3}{1570} \quad (4)$$

$$n_g = 32,06 \cong 32$$

As particularidades da moldagem de cada ensaio estão especificadas na Tabela 12, descrevendo o soquete e os moldes empregados, o número de camadas por corpo de prova e o número de golpes aplicado em cada camada.

Figura 18 - Moldes preparados com desmoldante para a moldagem



Tabela 12 - Características da moldagem

Ensaio	Soquete	Molde	Número de camadas	Número de golpes/camada
Resistência à compressão simples (RCS)	Proctor grande	Cilíndrico (10 x 20 cm)	3	32
Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	Proctor grande	Cilíndrico (10 x 20 cm)	3	32
Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	Marshall	Cilíndrico (10 x 6)	1	36
Resistência à tração na flexão (RTF)	Proctor grande	Prismático (10 x 10 x 40 cm)	2	123

Nas moldagens com número de camadas superior a um, realizou-se a escarificação de maneira a garantir aderência entre as camadas. Para executar a última camada, foi necessária a colocação de um colarinho complementar, visando o completo preenchimento do molde.

Quando finalizada a compactação do corpo de prova, retirava-se o cilindro complementar e com auxílio de material específico, aplanava-se o corpo de prova.

Adotou-se durante a compactação das camadas, um cuidado especial com a distribuição dos golpes nos corpos de prova prismáticos, buscando manter uma configuração padrão para que os mesmos atingissem toda a superfície do corpo de prova, assegurando que a compactação se desse de forma regular. Outro cuidado adotado foi a retirada de uma quantidade de material da betoneira para posterior verificação da umidade de moldagem. Na Figura 19 estão apresentadas as etapas de moldagem dos corpos de prova.

Figura 19 - Moldagem dos CPs



Após o término da moldagem dos corpos de prova, esses eram cobertos com sacos plásticos para que mantivessem a umidade, onde permaneciam por 48 horas conforme a Figura 20 até serem desmoldados e colocados na câmara úmida. A desmoldagem dos CPs 10 x 6 cm era feito pelo extrator de misturas asfálticas (Figura 21). Os mesmos foram armazenados a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de aproximadamente 95%, permanecendo nesse ambiente durante todo o tempo de cura estipulado (7 e 28 dias). Os CPs foram numerados

conforme a ordem de moldagem. Quando retirados da câmara úmida, os corpos de prova eram pesados e tinham suas medidas aferidas com paquímetro, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 20 - CPs cobertos com sacos plásticos até a desmoldagem



Figura 21 - Desmoldagem do CP 10 x 6 cm



Figura 22 - CPs desmoldados e numerados antes da câmara úmida



3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Para que um pavimento suporte as cargas a ele solicitadas, é necessário que esse esteja com boas condições estruturais, sendo que existem diferentes parâmetros que indicam o estado da estrutura de pavimentação, os quais podem ser avaliados a partir de diferentes ensaios mecânicos.

O presente programa experimental conta com os ensaios que podem ser realizados para análise de comportamento mecânico de bases de um pavimento. A seguir, encontra-se a discriminação individual dos ensaios realizados, assim como a metodologia utilizada e as principais características a respeito da sua realização. Todos os ensaios desta pesquisa foram realizados nas dependências do LMCC, na Universidade Federal de Santa Maria.

3.4.1 Resistência à compressão simples (RCS)

A Resistência à compressão Simples (RCS) ou resistência à compressão axial é largamente utilizada para dosagem e controle de qualidade de concreto de cimento Portland.

Para Andriolo & Sgarboza (1993) o conceito aceito para a resistência à compressão é o da habilidade de resistir forças, sendo que a resistência do concreto é um bom indicador das demais propriedades, tanto direta quanto inversamente proporcional. Em função disso, e pela maneira relativamente simples de determinar a resistência à compressão, ela é usada normalmente como índice para controle da qualidade e da avaliação de vários fatores como proporção de materiais, equipamentos de produção e condições de cura.

O ensaio de RCS seguiu a norma NBR 5739, foram utilizados 5 CPs cilíndricos de 10 x 20 cm para o ensaio em 7 dias de cura e mais 5 para 28 dias, mantidos em processo de cura úmida, para cada uma das seis misturas. Anterior ao ensaio aferiu-se o peso e as medidas do diâmetro e da altura de cada corpo de prova com auxílio de um paquímetro com precisão de centésimo de milímetro. Efetuadas as medidas, as faces dos CPs eram capeadas com enxofre fundido, conforme vemos na Figura 23.

Figura 23 - CPs com as faces capeadas de enxofre



Com o CP posicionado no eixo da máquina, a carga era aplicada continuamente sem choques com velocidade de carregamento de 0,3 MPa (Figura 24). O ensaio era finalizado assim que ocorresse a ruptura do CP, então registrava-se a máxima carga alcançada para posterior determinação da resistência à compressão simples de cada amostra. A resistência à compressão deve ser calculada através da Equação (5):

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (5)$$

Onde:

f_c : é a resistência à compressão, em MPa;

F: é a força máxima alcançada, em N;

D: é o diâmetro do CP, em mm.

Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão simples em andamento



3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

O ensaio de RTCD seguiu a norma NBR 7222 (2011), assim como nos outros ensaios, foram utilizados 5 CPs cilíndricos de 10 x 20 cm para o ensaio em 7 dias de cura e mais 5 para 28 dias, para cada uma das seis misturas. Esse ensaio também foi realizado com base no método de ensaio DNIT - ME 136/2010 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral, em CPs de 10 x 6 cm, com a finalidade de comparação dos resultados feitos em CPs com dimensões diferentes (Figura 25).

Os dois ensaios seguem o mesmo procedimento, que consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, com velocidade de deformação de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga.

Anteriormente aos ensaios cada CP foi pesado e aferido suas dimensões com paquímetro, para os CPs 10 x 20 cm foi colocado entre os pratos e o CP duas tiras de chapa dura de fibra de madeira, conforme vemos na Figura 26, então era realizado a carga até a ruptura do CP. A máxima carga alcançada era anotada para posterior cálculo da resistência à tração por compressão diametral, pela equação 6.

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad (6)$$

Onde:

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio (kN);

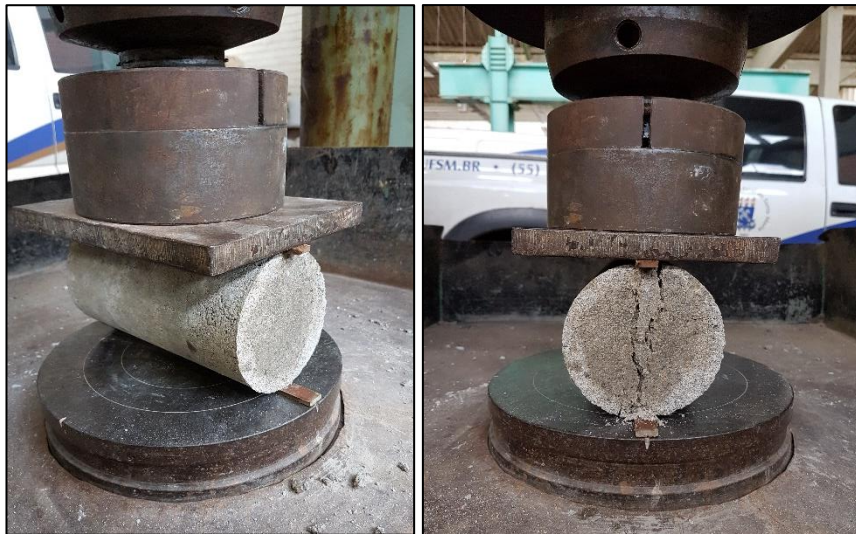
d = diâmetro do corpo-de-prova (mm)

L = altura do corpo-de-prova (mm)

Figura 25 - Ensaio de RTCD do CP 10 x 6 cm



Figura 26 - Ensaio de RTCD do CP 10 x 20 cm



3.4.3 Resistência à tração na flexão (RTF)

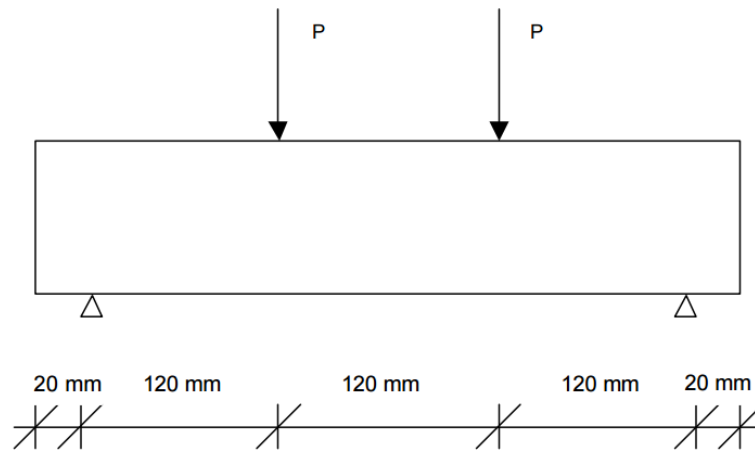
A resistência à tração na flexão é um dos parâmetros mais importantes nos dimensionamentos dos pavimentos de concreto tanto convencional, quanto de CCR. O critério da fadiga é influenciado pela resistência à flexão do concreto. Esta resistência é maior que a do concreto convencional. Ela se deve à massa específica da mistura na qual os agregados estão em contato um com outro. Este fato dificulta a propagação das fissuras; para que o trincamento aconteça é preciso uma maior quantidade de energia (ACRGTQ, 2001).

A massa específica aparente seca influencia a resistência à tração na flexão do concreto dependendo da faixa de consumo de cimento na qual se esteja trabalhando. Para baixos consumos de cimento ($< 200 \text{ kg/m}^3$), 1% na variação da massa específica aparente seca representa cerca de 4,5% na variação da resistência à flexão. Para consumos mais elevados ($> 260 \text{ kg/m}^3$), 1% de variação na massa específica aparente seca representa cerca de 2,9% na variação da resistência à flexão (TRICHÊS, 1993).

Conforme Cervo (2004) a velocidade sugerida pela norma para aplicação de carga em ensaios de CPs de dimensão padrão (15 x 15 x 50 cm) é de 0,13 kN/s, e considerando que a relação entre volumes dos dois tipos de CPs, é necessário diminuir a velocidade de aplicação da carga na mesma proporção, resultando um valor de 0,05 kN/s para CPs 10 x 10 x 40 cm. A Figura 27 mostra o esquema da execução deste ensaio.

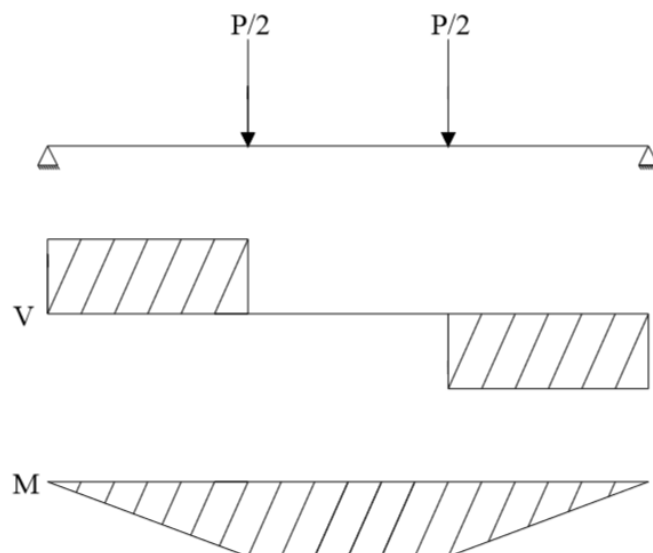
A Figura 28 mostra os diagramas de esforços solicitantes para este ensaio. Na Figura se observa que no terço central do CP o cortante é nulo e o momento de flexão é máximo. Neste trecho ocorre a ruptura do CP.

Figura 27 - Posição dos apoios e da carga aplicada para CPs de 400mm de comprimento.



Fonte – Cervo (2004)

Figura 28 - Diagrama de esforços solicitantes no ensaio de resistência a tração na flexão.



Fonte – Del Carpio (2009).

O ensaio de RTF foi realizado conforme a norma NBR 12142 (2010), foram utilizados CPs de 10 x 10 x 40 cm.

A preparação dos CPs para o ensaio consistiu na pesagem, aferição de suas medidas e marcação dos pontos que identificavam a posição das amostras na prensa (á 2 cm das faces laterais) e os pontos de aplicação de carga (no terço central do CP, distanciados á 6 cm para esquerda e para a direita do centro), como pode-se verificar na Figura 29. Neste caso como o CP foi moldado, as faces laterais com relação à posição de moldagem ficaram em contato com os elementos de aplicação de força e os apoios (Figura 30 a). A velocidade de aplicação de carga foi de 0,05 kN/s (Figura 30 b). O ensaio era finalizado assim que ocorresse a ruptura do CP (Figura 30 c), então registrava-se a máxima carga alcançada e a localização da ruptura, para posterior determinação da resistência à tração na flexão de cada amostra, pela Equação 7, já caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de l , deve ser calculada pela Equação 8.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (7)$$

$$f_{ct,f} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (8)$$

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

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

l é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

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

Figura 29 - CPs marcados para realização do ensaio de RTF



Figura 30 - (a) CP posicionado na prensa para ensaio, (b) ensaio em andamento com início de ruptura, (c) CP rompido, (d) seção do CP rompido



(a)

(b)



(c)



(d)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, os quais são analisados, discutidos e comparados com os alcançados por outros autores. A apresentação dos resultados segue a mesma ordem dos procedimentos metodológicos.

4.1 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Para a presente pesquisa foi necessário realizar um ensaio de compactação para cada mistura, para descobrir a umidade ótima de cada uma delas, ou seja, foram efetuadas seis compactações, sendo duas do CCR referência com consumo de 100 e 150 kg/m³ e as outras com as substituições por fresado.

Para melhor visualização dos resultados obtidos, optou-se por agrupá-los em função do consumo de cimento. Assim, tem-se as curvas de compactação apresentadas nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - Curvas de compactação do CCR com consumo de 100 kg/m³ e substituição por 10 e 30% de fresado

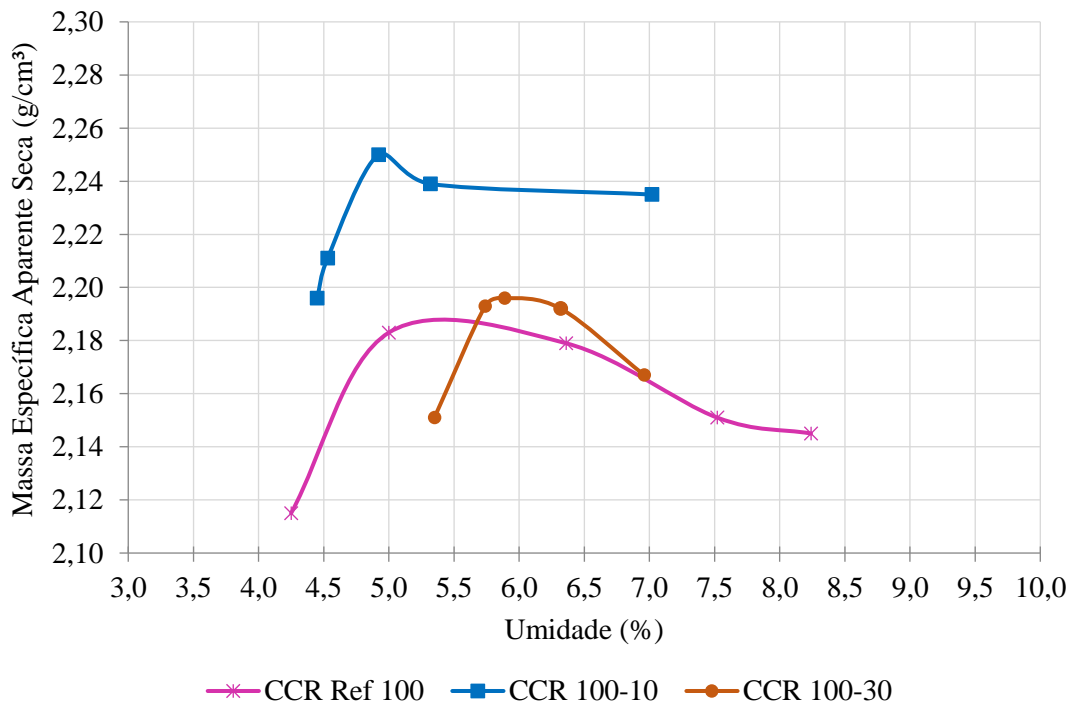
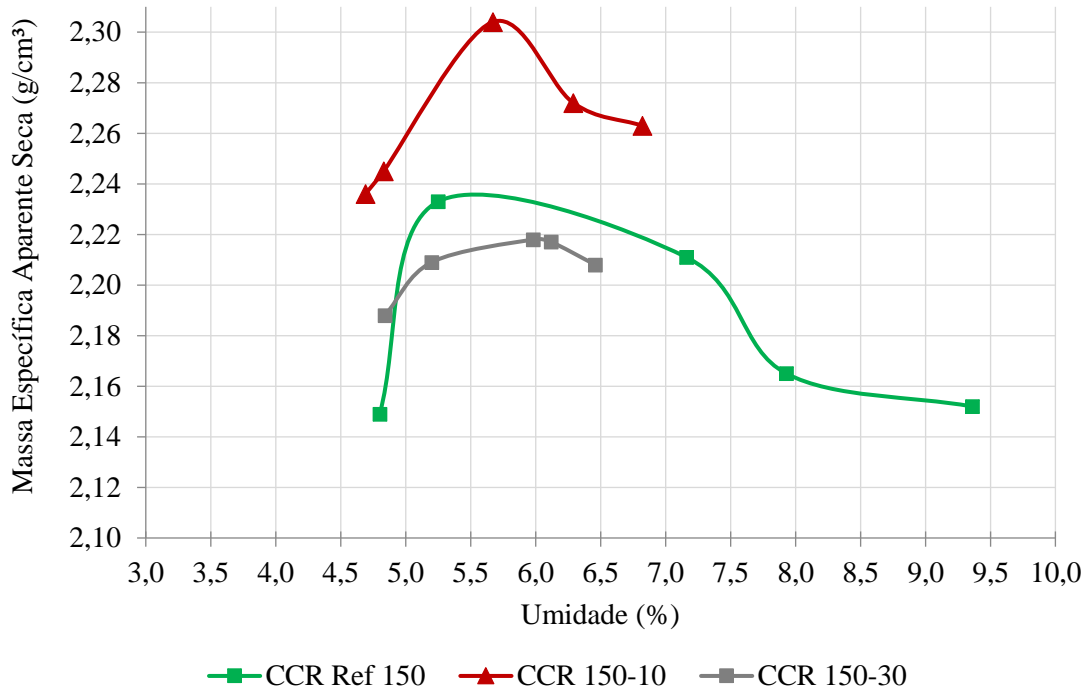


Figura 32 - Curvas de compactação do CCR com consumo de 150 kg/m³ e substituição por 10 e 30% de fresado



A análise dos resultados das curvas e dos parâmetros de compactação dos materiais em estudo permite afirmar que o aumento no consumo de cimento leva ao acréscimo da massa específica aparente seca.

Nota-se claramente também que a substituição por fresado ocasiona um aumento expressivo na massa específica aparente seca do CCR, com exceção da mistura CCR 150-30, que teve um decréscimo na massa específica aparente seca.

Na Tabela 13 estão apresentadas as umidades ótimas e as massas específicas aparentes secas obtidas para cada CCR confeccionado. Comparando-se as umidades de todos os CCR produzidos, notou-se que as misturas contendo a substituição de 30% por fresado foram as que apresentaram maior umidade. Porém pode-se dizer que a variação da umidade ótima entre as misturas foi muito baixa, variando entre 5% e 6%.

Ainda na Tabela 13 observa-se que a variabilidade da massa específica aparente seca máxima é pequena (variação entre 2,188 e 2,304 g/cm³), mas pode-se perceber que as maiores massas específicas aparentes secas foram nas misturas que continham substituição de 10% de fresado.

Para Pitta (1998) um CCR com um consumo de 135 kg/m^3 tem suas propriedades típicas de massa específica aparente máxima seca entre 2150 a 2300 kg/m^3 , percebe-se que os valores são muito próximos aos adquiridos por essa pesquisa.

Tabela 13 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação

Mistura	Umidade ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm^3)
CCR 100-0	5,45	2,188
CCR 100-10	5,00	2,250
CCR 100-30	6,00	2,196
CCR 150-0	5,55	2,236
CCR 150-10	5,75	2,304
CCR 150-30	6,00	2,218

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Para a realização dos ensaios de RCS foram utilizados cinco CPs por mistura, a Tabela 14 mostra a média dos resultados do ensaio e seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação, nas idades de 7 e 28 dias de cura. Destaca-se que os valores de coeficiente de variação obtidos se encontram abaixo de 8%.

Tabela 14 - Valores de resistência à compressão simples de CPs $10 \times 20 \text{ cm}$

Mistura	RCS média (MPa)					
	7 dias	Desvio padrão	CV (%)	28 dias	Desvio padrão	CV (%)
CCR 100-0	6,8	0,15	2,21	8,2	0,35	4,27
CCR 100-10	7,85	0,46	5,86	9,21	0,21	2,28
CCR 100-30	5,74	0,33	5,75	6,17	0,44	7,13
CCR 150-0	11,32	0,59	5,21	16,27	0,22	1,35
CCR 150-10	11,42	0,66	5,78	12,78	0,38	2,97
CCR 150-30	10,3	0,53	5,15	11,69	0,15	1,28

Analisando os resultados obtidos, a partir da Figura 33 e 34 é possível dizer que o aumento do consumo de cimento de 100 para 150 kg/m³ tem uma grande influência positiva na resistência à compressão simples das misturas, independente do tempo de cura.

Figura 33 - Influência do fresado na RCS das misturas com consumo de 100 kg/m³

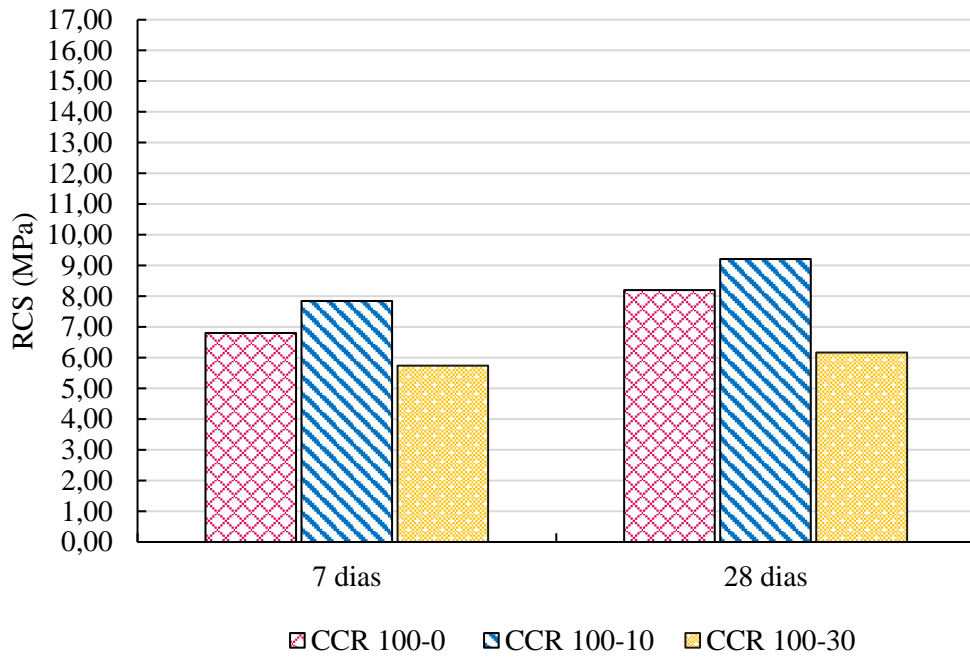
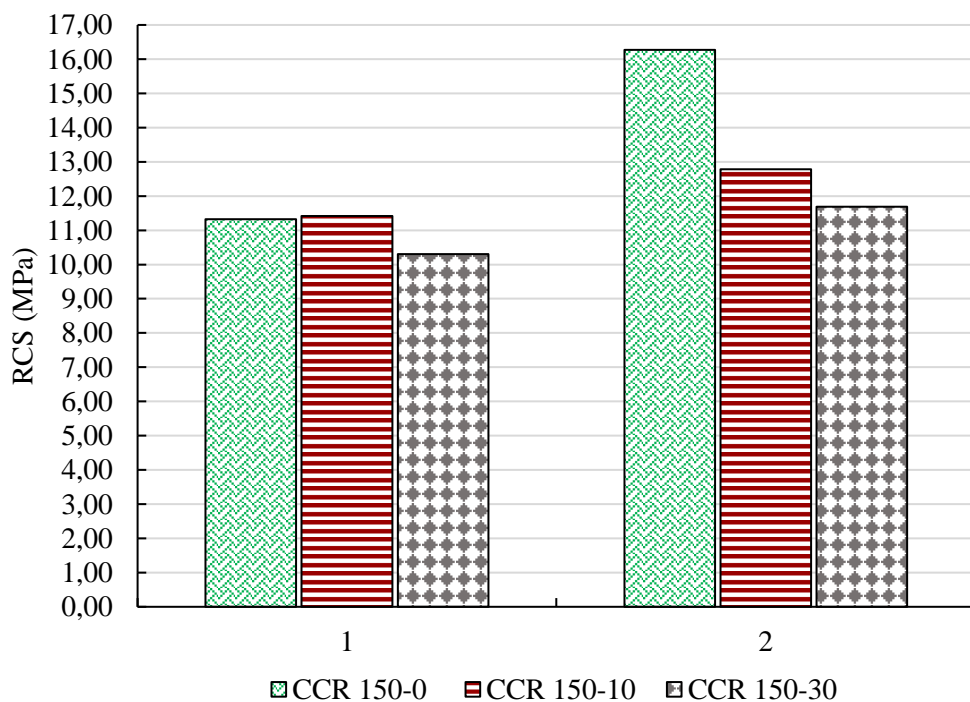


Figura 34 - Influência do fresado na RCS das misturas com consumo de 150 kg/m³



Em relação a influência do fresado, pode-se observar nas Figuras 33 e 34, que com um consumo de 100 kg/m^3 a substituição de 10% foi positiva em relação ao CCR referência, tendo sua resistência um pouco superior nas duas idades de cura, mas um decréscimo quando a substituição aumenta para 30%. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a substituição de 10% praticamente se igualou ao CCR referência, na idade de 7 dia de cura, mas um decréscimo quando a substituição aumenta para 30%, já aos 28 dias de cura, a substituição de agregados graúdos por fresado influenciou negativamente em todas as misturas.

Com o intuito de melhor visualização das variações das resistências à compressão simples os resultados foram tabelados conforme as Tabelas 15 e 16. Percebe-se que nas misturas com o consumo de cimento mais baixo (100 kg/m^3) a substituição de 10% de fresado fez com que a RCS crescesse 15,44% com 7 dias de cura em relação a mistura de referência, e aos 28 dias teve um aumento de 12,32%. Mas quando a substituição por fresado subiu para 30% as resistências tiveram uma queda de 15,59% e 24,76% nos 7 e 28 dias respectivamente. Quando se compara as misturas em relação aos dias de cura, todas tiveram um aumento de resistência dos 7 para os 28 dias, com os incrementos situados entre 7% e 21%.

Baseando-se nos valores obtidos na Tabela 15 pode-se concluir que a maior RCS das misturas com consumo de 100 kg/m^3 foi a CCR 100-10, que continha 10% de fresado, tanto aos 7 como nos 28 dias. Pode-se observar que os valores de RCS seguiram um padrão quando relacionadas às massas específicas aparentes secas, a mistura que obteve uma maior massa específica aparente seca foi a que teve a maior RCS.

Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a maior RCS aos 7 dias de cura, também foi da mistura CCR 150-10, que continha 10% de fresado, ficando com um acréscimo de 0,88% em relação a mistura de referência, e aos 28 dias de cura foi da mistura referência que não continha material fresado, à medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há uma diminuição do valor da resistência das mesmas, diminuindo 9,01% na mistura com 30% de fresado, para 7 dias de cura, já para os 28 dias de cura a mistura com 10% teve um decréscimo de 21,45% e a de 30% um decréscimo de 28,15%, a qual pode ser atribuída à quantidade de pequenos grumos que são formados por material fino e ligante asfáltico causando um aumento da quantidade de poros nessa mistura.

Todas as misturas apresentaram RCS maiores que a indicada pela norma DNIT 056/2004 – ES, que é 5 MPa aos 7 dias de cura. Para Godinho (1988) a RCS do CCR deve apresentar aos 28 dias de idade, valores entre 5 MPa e 8 MPa, já para Pitta (1998) o CCR com um consumo de 135 kg/m^3 tem propriedades típicas de resistência à compressão simples de 11 MPa aos 28 dias de cura, o que também foi alcançado por todas as misturas.

Tabela 15 - Taxas de variação nos ensaios de RCS, com consumo de cimento de 100 kg/m³

Mistura	RCS média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 100-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 100-0	6,8	7	-	-
CCR 100-10	7,85	7	+15,44 %	-
CCR 100-30	5,74	7	-15,59 %	-
CCR 100-0	8,2	28	-	+20,59 %
CCR 100-10	9,21	28	+12,32 %	+17,32 %
CCR 100-30	6,17	28	-24,76 %	+7,49 %

Tabela 16 - Taxas de variação nos ensaios de RCS, com consumo de cimento de 150 kg/m³

Mistura	RCS média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 150-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 150-0	11,32	7	-	-
CCR 150-10	11,42	7	+0,88%	-
CCR 150-30	10,3	7	-9,01 %	-
CCR 150-0	16,27	28	-	+43,73 %
CCR 150-10	12,78	28	-21,45 %	+11,91 %
CCR 150-30	11,69	28	-28,15 %	+13,50 %

Essa queda de resistência pode ser atribuída à presença do ligante asfáltico no RAP e pelo fato deste material possuir muitos grumos, que são formados pelo material asfáltico e a porção fina do RAP, o que gera certa heterogeneidade da mistura em consequência da granulometria do fresado. Além disso, o filme asfáltico presente nos grãos de RAP provavelmente desfavoreceu o estabelecimento de ligações de cristais de hidratação do cimento com os mesmos, causando redução na resistência à compressão.

Paulon e Monteiro (1991) partem do princípio que “no concreto de cimento Portland, a pasta de cimento forma uma auréola em torno do agregado, onde a cristalização dos hidratados é diferente da existente na mesma pasta, fora dessa zona de transição. Essa auréola ou zona de transição é um local com características mais fracas do concreto”. Segundo os autores, a zona

de transição é uma zona com relação água/cimento mais elevada e de menos coesão, na qual as fissuras se propagam com maior facilidade. Nos concretos secos, em que a quantidade de pasta não é suficiente para cobrir todos os agregados de forma homogênea e completa, é dúbio o fato de que a auréola exista ou não, mas constata-se a fragilidade da zona de transição entre agregado e pasta de cimento.

Fedrigo (2012) estudou o comportamento do CCR para ser utilizado como base para pavimentos. No estudo foram utilizados dois consumos de cimento, 80 kg/m^3 e 200 kg/m^3 . As energias de compactação foram equivalentes às energias dos ensaios de Proctor normal e modificado. O cimento utilizado foi o CP-V ARI e como agregados foram utilizados: pedra britada (nº 0 – $\frac{1}{2}$ " e nº 1 – $\frac{3}{4}$ ") e areia artificial. Os resultados de resistência à compressão simples encontrados pelo autor foram de 1,24 MPa para um consumo de 80 kg/m^3 na energia normal, e 4,61 MPa na energia modificada, o que ficaram abaixo se comparado com essa pesquisa, para o consumo de 200 kg/m^3 os resultados foram de 8,36 na energia normal e 12,37 na energia modificada, resultado esse muito próximo ao encontrado nessa pesquisa, mesmo o autor tendo utilizado um consumo de cimento superior. Pode-se perceber que para um baixo consumo de cimento o ideal seria aplicar uma maior energia de compactação, já que implicou no aumento de 4 vezes na RCS. Vale ressaltar que na pesquisa de Fedrigo (2012) a composição de todas as misturas foram com 100% de agregados naturais.

Observando essas conclusões, pode-se afirmar, que em relação a presente pesquisa, quando o interesse é uma maior economia, o indicado seria utilizar a mistura contendo a menor quantidade de cimento, e com a maior substituição de agregados naturais por fresado, porém utilizando de uma maior energia de compactação, o que ocasionaria consequentemente uma maior resistência à compressão simples.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Para a realização dos ensaios de RTCD foram utilizados cinco CPs por mistura, a Tabela 17 mostra a média dos resultados do ensaio e seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação, em cada idade de cura.

Tabela 17 - Valores de resistência à tração por compressão diametral de CPs 10 x 20 cm

Mistura	RTCD média (MPa)					
	7 dias	Desvio padrão	CV (%)	28 dias	Desvio padrão	CV (%)
CCR 100-0	0,60	0,07	11,67	0,82	0,06	7,32
CCR 100-10	0,71	0,04	5,63	1,05	0,03	2,86
CCR 100-30	0,56	0,05	8,93	0,77	0,03	3,90
CCR 150-0	1,73	0,07	4,05	2,27	0,12	5,29
CCR 150-10	1,33	0,04	3,01	1,94	0,06	3,09
CCR 150-30	1,26	0,06	4,76	1,67	0,15	8,98

Analisando os resultados obtidos, a partir da Figura 35 e 36 é possível dizer que o aumento do consumo de cimento influência de forma positiva na resistência a tração por compressão diametral das misturas, independente do tempo de cura.

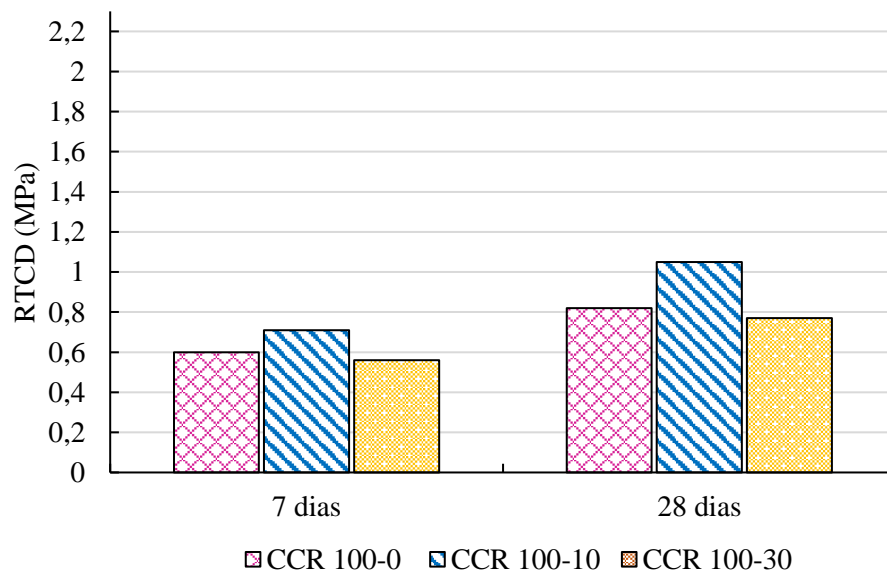
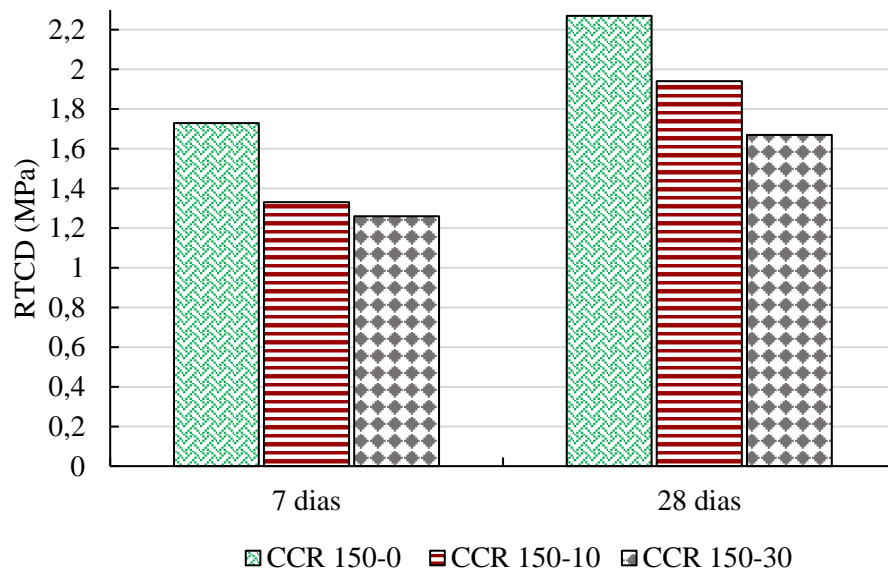
Figura 35 - Influência do fresado na RTCD das misturas com consumo de 100 kg/m³

Figura 36 - Influência do fresado na RTCD das misturas com consumo de 150 kg/m³



Em relação a influência do fresado, pode-se observar nas Figuras 35 e 36, que com um consumo de 100 kg/m³ a substituição de 10% foi positiva em relação ao CCR referência, tendo sua resistência um pouco superior nas duas idades de cura, mas um decréscimo quando a substituição aumenta para 30%. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m³ a substituição de agregados graúdos por fresado influenciou negativamente em todas as misturas. Porém pode-se dizer que essas influências são baixas.

Com o intuito de melhor visualização das variações das resistências à tração por compressão diametral os resultados foram tabelados conforme as Tabelas 18 e 19. Percebe-se que nas misturas com o consumo de cimento mais baixo (100 kg/m³) a substituição de 10% de fresado fez com que a RTCD crescesse 18,33% com 7 dias de cura em relação a mistura de referência, e aos 28 dias teve um aumento de 28,05%. Mas quando a substituição por fresado subiu para 30% as resistências tiveram uma queda de 6,67% e 6,10% nos 7 e 28 dias respectivamente. Quando se compara as misturas em relação aos dias de cura, todas tiveram um aumento de resistência dos 7 para os 28 dias, com os incrementos situados entre 35% e 50%.

Baseando-se nos valores obtidos na Tabela 18 pode-se concluir que a maior RTCD das misturas com consumo de 100 kg/m³ foi a CCR 100-10, que continha 10% de fresado, tanto aos 7 como nos 28 dias.

Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m³ a maior RTCD foi da mistura referência que não continha material fresado, à medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há uma diminuição do valor da resistência das mesmas, sendo de

23,12% na mistura com 10% de fresado e 27,17% na mistura com 30% de fresado, para 7 dias de cura, já para os 28 dias de cura a mistura com 10% teve um decréscimo de 14,54% e a de 30% um decréscimo de 26,43%, a qual pode ser atribuída à quantidade de pequenos grumos que são formados por material fino e ligante asfáltico causando um aumento da quantidade de poros nessa mistura.

Tabela 18 - Taxas de variação nos ensaios de RTCD dos CPs 10 x 20 cm, com consumo de cimento de 100 kg/m³

Mistura	RTCD média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 100-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 100-0	0,6	7	-	-
CCR 100-10	0,71	7	+18,33 %	-
CCR 100-30	0,56	7	-6,67 %	-
CCR 100-0	0,82	28	-	+36,67 %
CCR 100-10	1,05	28	+28,05 %	+47,89 %
CCR 100-30	0,77	28	-6,10 %	+37,50 %

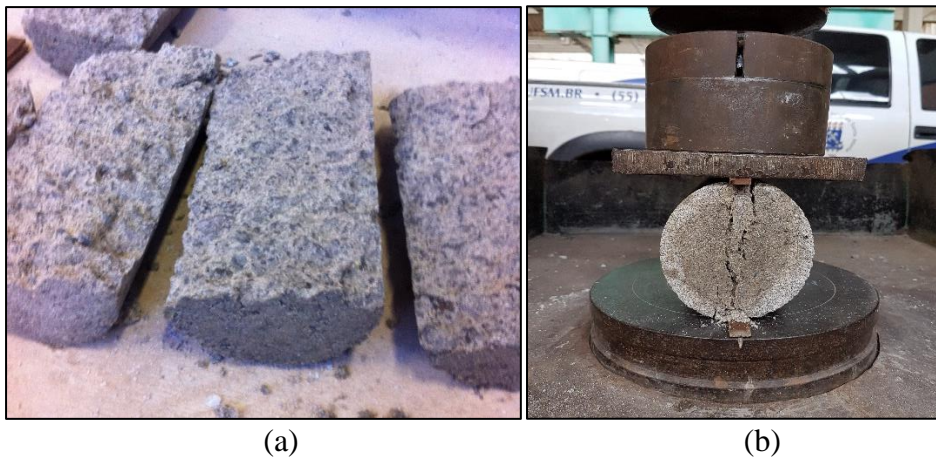
Tabela 19 - Taxas de variação nos ensaios de RTCD dos CPs 10 x 20 cm, com consumo de cimento de 150 kg/m³

Mistura	RTCD média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 150-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 150-0	1,73	7	-	-
CCR 150-10	1,33	7	-23,12 %	-
CCR 150-30	1,26	7	-27,17 %	-
CCR 150-0	2,27	28	-	+31,21 %
CCR 150-10	1,94	28	-14,54 %	+45,86 %
CCR 150-30	1,67	28	-26,43 %	+32,54 %

Um dado interessante observado durante a realização dos ensaios de tração indireta foi o comportamento das amostras de CCR. As amostras com 0% de fresado tiveram fratura do tipo abruptas com separação do CP cilíndrico (Figura 37 a). As amostras com emprego de RAP tiveram as fraturas mais sutis, ou seja, os cilindros não se separaram e continuaram apresentando uma certa capacidade portante após a fratura inicial (Figura 37 b). Esse

comportamento durante a ruptura pode ser atribuído ao fato de que o agregado fresado é um agregado fraturado, pela natureza da sua extração no campo e a natureza visco-elástica do ligante asfáltico presente no material fresado. Portanto, a ruptura provavelmente se dá na interface entre agregado fresado e argamassa, pois no caso onde não havia presença do agregado fresado, a resistência deveu-se aos cristais de cimento presentes na argamassa, já no caso onde havia agregados fresados a referida resistência pode ser atribuída à mesma ligação de cristais de cimento, contudo apresenta sensivelmente menor poder de ligação com o ligante asfáltico.

Figura 37 - Ensaio de compressão diametral: (a) CCR referência, (b) CCR com fresado



A Figura 38 mostra uma imagem aproximada de um corpo de prova rompido por compressão diametral. Onde puderam ser constatados alguns pontos de quebra do material fresado, notando-se pelo contraste das cores escuras do fresado com a cor clara do cimento. Os pontos escuros maiores representam o material fresado formado por grumos, que na granulometria compõem os agregados graúdos da mistura. Essa visualização colabora com a ideia de baixa resistência do fresado, tornando este um possível ponto fraco da mistura.

Figura 38 - Imagem aproximada de amostra rompida à compressão diametral



Sachet (2012), também estudou sobre misturas de CCR com adição de fresado em relação à resistência à tração por compressão diametral, o consumo de cimento utilizado foi 100 kg/m^3 para todas as misturas com cimento tipo CPIII-40-RS. Os resultados obtidos foram para a idade de cura de 35 dias, da ordem de 2,45 e 2,06 MPa, respectivamente, para as misturas de referência. Já para as misturas com fresado os valores foram de 0,96, 1,64, 1,48 e 1,21 MPa para as misturas com adição de 37%, 39%, 24% e 50% de fresado, respectivamente. Valores estes, que comparados com a presente pesquisa, apresentam-se um pouco superiores. É importante salientar que o tempo de cura utilizado pelo autor foi de 7 dias a mais que essa pesquisa, além de utilizar outro tipo de cimento.

Fedrico (2012) também estudou o comportamento do CCR em relação a resistência à tração por compressão diametral, os valores encontrados pelo autor foram de 0,21 MPa para um consumo de 80 kg/m^3 na energia normal, bem abaixo dos valores desta pesquisa e 0,62 MPa na energia modificada, que praticamente se igualou aos resultados das misturas de 100 kg/m^3 desta pesquisa, para o consumo de 200 kg/m^3 os resultados foram de 1,22 MPa na energia normal e 1,40 MPa na energia modificada, valores bem próximos dessa pesquisa.

Conforme comentado anteriormente o ensaio de RTCD foi efetuado também em corpos de prova de dimensões $10 \times 6 \text{ cm}$, com o intuito de reaproveitar os CPs utilizados pelo ensaio de módulo de resiliência, assim tem-se a oportunidade de comparar os resultados obtidos em CPs com dimensões diferentes. Na Tabela 20, pode-se ver a média dos valores de RTCD nos CPs $10 \times 6 \text{ cm}$.

Tabela 20 - Valores de resistência à tração por compressão diametral de CPs 10 x 6 cm

Mistura	RTCD média (MPa)					
	7 dias	Desvio padrão	CV (%)	28 dias	Desvio padrão	CV (%)
CCR 100-0	0,69	0,08	11,59	1,02	0,05	4,90
CCR 100-10	0,78	0,11	14,10	1,03	0,13	12,62
CCR 100-30	0,49	0,02	4,08	0,74	0,05	6,76
CCR 150-0	1,68	0,14	8,33	2,5	0,11	4,40
CCR 150-10	1,60	0,19	11,88	1,91	0,13	6,81
CCR 150-30	1,37	0,09	6,57	1,73	0,07	4,05

Como pode-se ver na Tabela 21, a variação dos resultados com CPs de dimensões diferentes foram plenamente satisfatórios, onde se obteve um valor máximo de 0,27 MPa, e uma média de variação de apenas 0,07 MPa, resultando em resistências muito próximas.

Nas Figuras 39 e 40 pode-se observar os resultados na forma de gráfico, para melhor visualização das variações das resistências, onde as cores mais escuras são os CPs 10 x 20 cm e as cores mais claras os CPs 10 x 6 cm.

Tabela 21 - Variação de RTCD entre CPs 10 x 20 cm e 10 x 6 cm

Mistura	Dias de cura	RTCD média CPs 10x20cm (MPa)	RTCD média CPs 10x6cm (MPa)	Diferença de resistência (MPa)	Variação (%)
CCR 100-0	7	0,6	0,69	0,09	15,00
CCR 100-10	7	0,71	0,78	0,07	9,86
CCR 100-30	7	0,56	0,49	-0,07	-12,50
CCR 100-0	28	0,82	1,02	0,20	24,39
CCR 100-10	28	1,05	1,03	-0,02	-1,90
CCR 100-30	28	0,77	0,74	-0,03	-3,90
CCR 150-0	7	1,73	1,68	-0,05	-2,89
CCR 150-10	7	1,33	1,6	0,27	20,30
CCR 150-30	7	1,26	1,37	0,11	8,73
CCR 150-0	28	2,27	2,5	0,23	10,13
CCR 150-10	28	1,94	1,91	-0,03	-1,55
CCR 150-30	28	1,67	1,73	0,06	3,59
Média				0,07	5,77

Figura 39 - Comparação das RTCD em CPs com dimensões diferentes (consumo de 100 kg/m³)

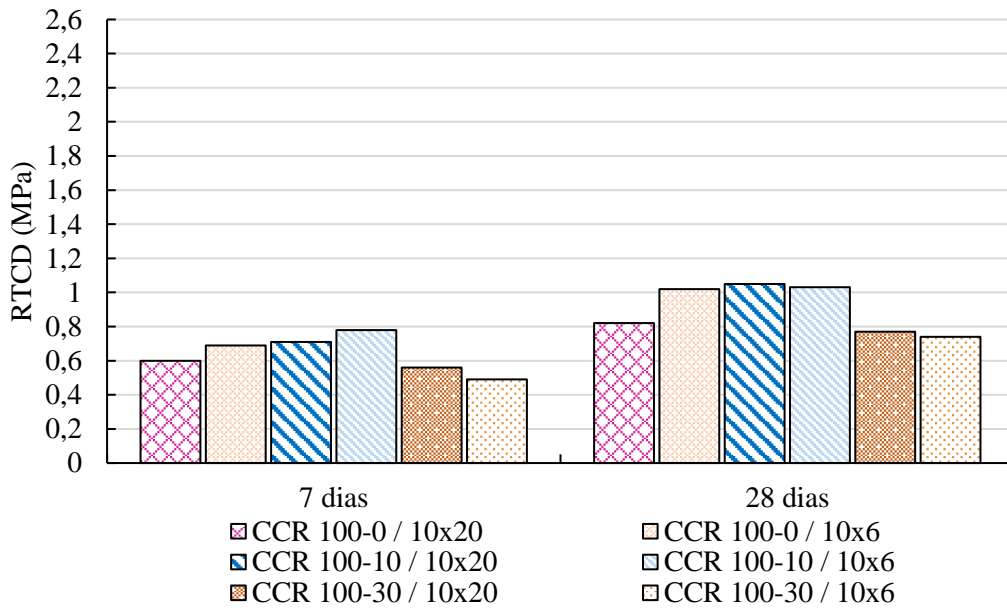
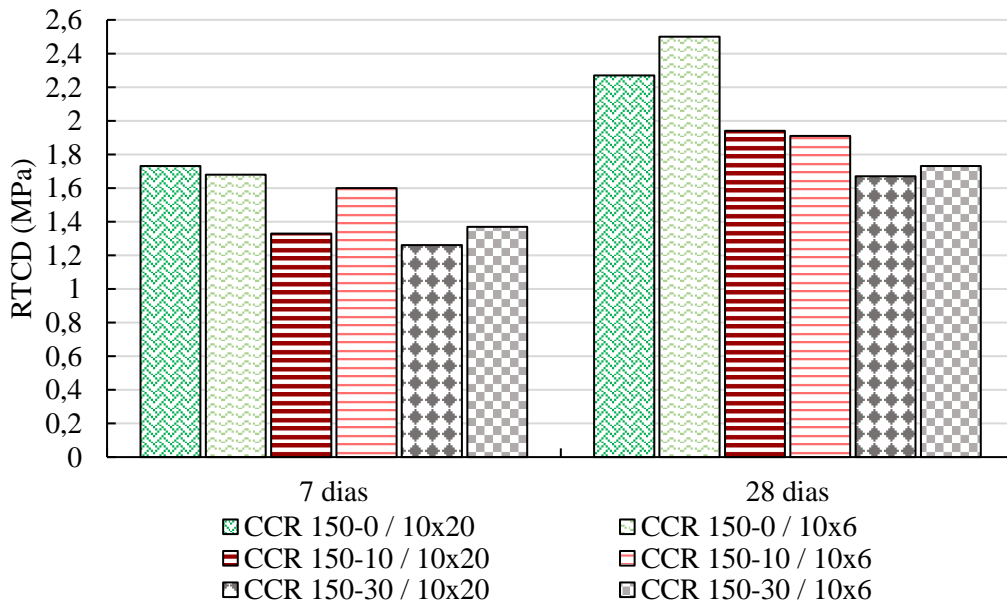


Figura 40 - Comparação das RTCD em CPs com dimensões diferentes (consumo de 150 kg/m³)



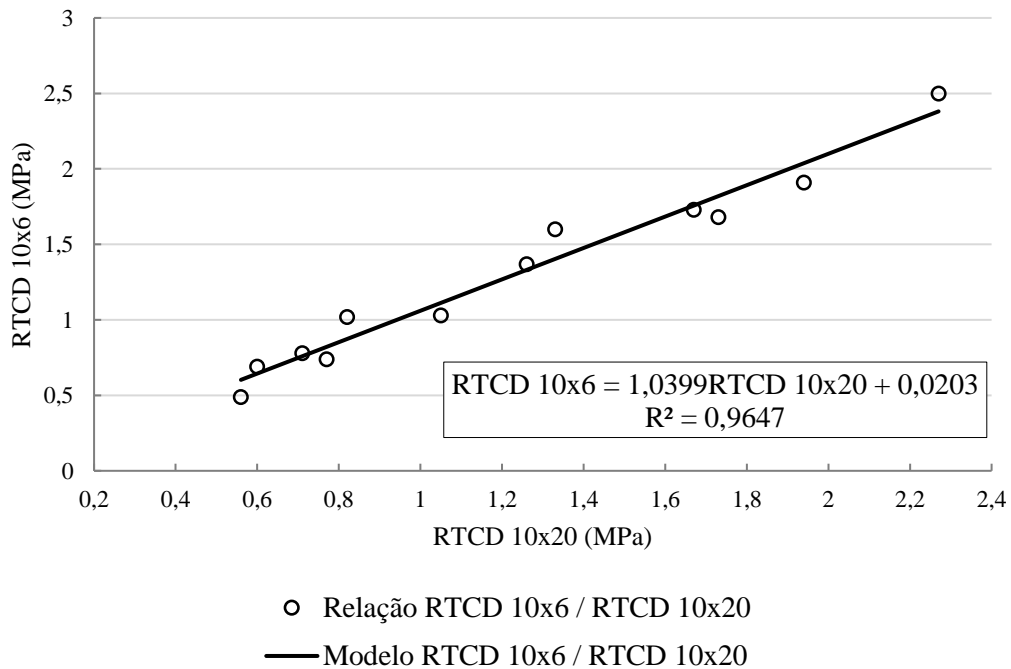
Na Figura 41 foi realizada a correlação estatística entre RTCD com CPs 10x6cm e a RTCD com CPs 10x20cm, aos 7 e 28 dias de cura, a fim de verificar a existência de uma correlação significativa. Na própria figura também é apresentado o modelo da RTCD 10x6 em

função da RTCD 10x20. Assim, é possível comprovar a grande proximidade dos resultados entre CPs de dimensões diferentes.

A Figura 41 demonstra que a correlação entre os resultados para misturas de CCR é expressiva, já que o R^2 obtido foi de 0,96. Pela regressão linear pode-se observar outro fator que mostra uma evidência estatística de relação entre os resultados, o valor-p que teve um valor de 0,001, que mostra essa forte evidência pois chega muito próximo a zero.

Desta maneira, o modelo numérico que representa a relação entre RTCD 10x6 e RTCD 10x20 está disponibilizado na Figura 41.

Figura 41 - Correlação estatística entre RTCD 10x6 e RTCD 10x20



4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)

Os ensaios de RTF foram realizados em corpos de prova prismáticos, sendo em 5 amostras aos 7 dias e 5 amostras aos 28 dias de cura para todas as misturas, a Tabela 22 mostra a média dos resultados do ensaio e seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação, em cada idade de cura.

Tabela 22 - Valores de resistência à tração na flexão

Mistura	RTF média (MPa)					
	7 dias	Desvio padrão	CV (%)	28 dias	Desvio padrão	CV (%)
CCR 100-0	0,55	0,05	9,09	1,12	0,12	10,71
CCR 100-10	0,71	0,08	11,27	1,12	0,17	15,18
CCR 100-30	0,63	0,13	20,63	0,87	0,07	8,05
CCR 150-0	1,60	0,12	7,50	1,96	0,09	4,59
CCR 150-10	1,44	0,08	5,56	1,90	0,21	11,05
CCR 150-30	1,59	0,08	5,03	1,92	0,04	2,08

Analisando os resultados obtidos, a partir das Figuras 42 e 43 é possível dizer que o aumento do consumo de cimento de 100 para 150 kg/m³ tem uma grande influência positiva na resistência à tração na flexão das misturas, independente do tempo de cura. Pode-se observar que aos 7 dias as duas misturas com consumo de 100 kg/m³ mais a substituição de 10 e 30% do fresado tiveram suas RTF superiores a mistura de referência, mas quando se aumenta o consumo de cimento para 150 kg/m³ a mistura com 10% de fresado sofre uma queda em relação a mistura de referência, enquanto a mistura com 30% de fresado se iguala ao referência. Já aos 28 dias as misturas tiveram um acréscimo de valores se comparado aos 7 dias e quando comparada ao referência as misturas com emprego de fresado praticamente se igualaram, com exceção a mistura CCR 100-30, que teve seu valor inferior.

Figura 42 - Influência do fresado na RTF das misturas com consumo de 100 kg/m³

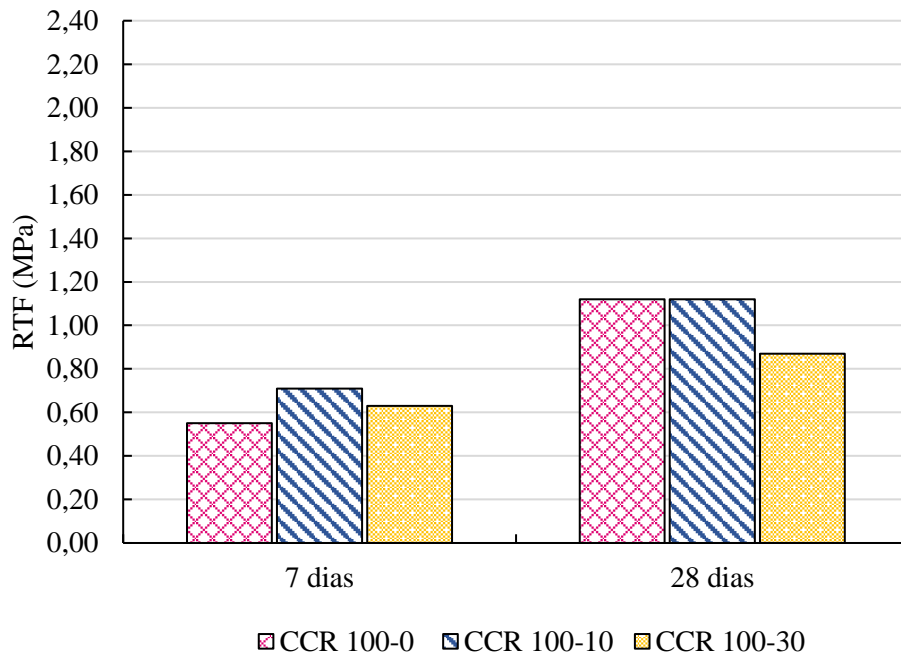
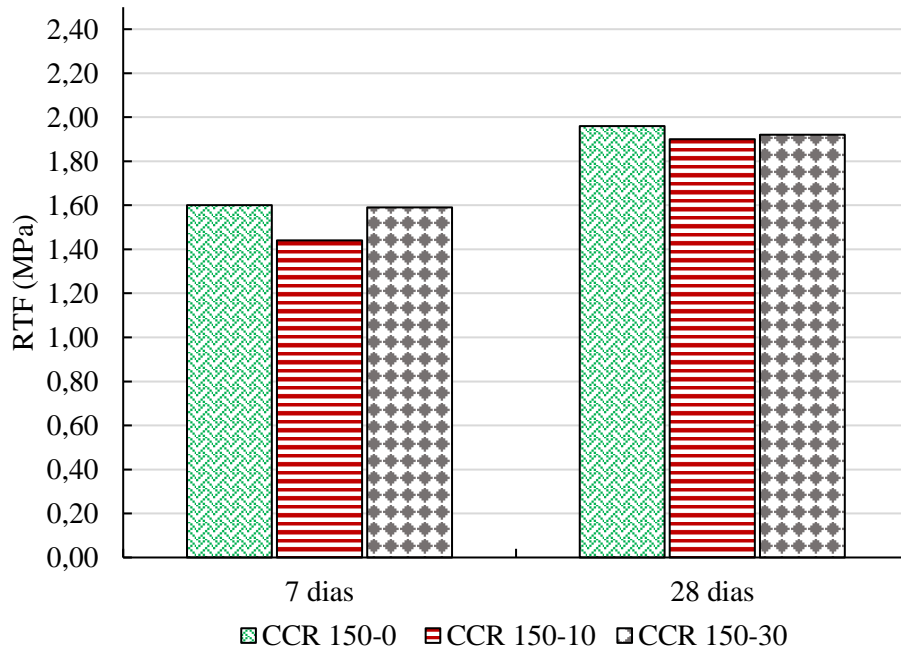


Figura 43 - Influência do fresado na RTF das misturas com consumo de 150 kg/m³



Em relação a influência do fresado, pode-se observar nas Figuras 42 e 43, que com um consumo de 100 kg/m³ a substituição de 10% foi positiva em relação ao CCR referência, tendo

sua resistência um pouco superior na idade de 7 dias de cura, e aos 28 dias se igualou a mistura de referência enquanto a de 30% aumentou aos 7 dias e diminuiu aos 28 dias. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 todas as misturas aos 7 e aos 28 dias de cura ficaram muito próximas.

Com o intuito de melhor visualização das variações das resistências à tração na flexão os resultados foram tabelados conforme as Tabelas 23 e 24. Percebe-se que nas misturas com o consumo de cimento mais baixo (100 kg/m^3) a substituição de 10% de fresado fez com que a RTF crescesse 29,09% com 7 dias de cura em relação a mistura de referência, e aos 28 dias se igualou a mistura de referência. Na substituição por fresado de 30% a resistência também teve um aumento de 14,55% aos 7 dias, já nos 28 dias a RTF cai 22,32%. Quando se compara as misturas em relação aos dias de cura, todas tiveram um aumento de resistência dos 7 para os 28 dias, com um incremento que chegou a 103,64% na mistura de referência, 57,75% para a mistura CCR 100-10 e 38,1% para a mistura CCR 100-30.

Baseando-se nos valores obtidos na Tabela 23 pode-se concluir que a maior RTF das misturas com consumo de 100 kg/m^3 foi a CCR 100-10, que continha 10% de fresado, tanto aos 7 como nos 28 dias.

Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a maior RTF aos 7 dias de cura, foi da mistura referência, e aos 28 dias de cura também foi da mistura referência que não continha material fresado, à medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há uma queda do valor da resistência das mesmas, de 10% na mistura com 10% de fresado e 0,63% na mistura com 30% de fresado, para 7 dias de cura, já para os 28 dias de cura a mistura com 10% teve um decréscimo de 3,06% e a de 30% um decréscimo de 2,04%, a qual pode ser atribuída à quantidade de pequenos grumos que são formados por material fino e ligante asfáltico causando um aumento da quantidade de poros nessa mistura.

De acordo com as instruções de projeto da prefeitura de São Paulo, IP 07/2004- Dimensionamento de pavimentos de concreto, as bases de concreto compactado com rolo, deverão apresentar um valor de resistência à tração na flexão igual ou superior a 1,5 MPa aos 28 dias, como aconteceu com todas as misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 desta pesquisa. Já as misturas com consumo de cimento de 100 kg/m^3 não alcançaram o valor mínimo indicado.

Tabela 23 - Taxas de variação nos ensaios de RTF, com consumo de cimento de 100 kg/m³

Mistura	RTF média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 100-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 100-0	0,55	7	-	-
CCR 100-10	0,71	7	+29,09 %	-
CCR 100-30	0,63	7	+14,55 %	-
CCR 100-0	1,12	28	-	+103,64 %
CCR 100-10	1,12	28	0,00 %	+57,75 %
CCR 100-30	0,87	28	-22,32 %	+38,10 %

Tabela 24 - Taxas de variação nos ensaios de RTF, com consumo de cimento de 150 kg/m³

Mistura	RTF média (MPa)	Dias de cura	Variação da resistência em relação a Ref. (CCR 150-0) (%)	Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%)
CCR 150-0	1,60	7	-	-
CCR 150-10	1,44	7	-10,00 %	-
CCR 150-30	1,59	7	-0,63 %	-
CCR 150-0	1,96	28	-	+22,50 %
CCR 150-10	1,90	28	-3,06 %	+31,94 %
CCR 150-30	1,92	28	-2,04 %	+20,75 %

Como foi discutido anteriormente a união de grãos grossos e finos com ligante asfáltico enfraquece o agregado que tem papel fundamental no suporte das cargas. Esta fração estando enfraquecida leva a quedas nas resistências.

A influência do acréscimo de fresado na RTF em misturas de CCR também foi estudado por Sachet (2012), no estudo, CPs das mesmas dimensões, compactados na energia normal, para misturas com 100 kg/m³ de consumo de cimento do tipo CPIII-40-RS, e 35 dias de cura foram submetidos a ensaios de RTF. Os resultados obtidos foram da ordem de 4,23 e 3,91 MPa, respectivamente, para as misturas de referência. Já para as misturas com fresado os valores foram de 3,78, 3,80, 2,37 e 2,55 MPa para as misturas com adição de 37%, 39%, 24% e 50% de fresado, respectivamente. Mesmo que as misturas não sejam iguais do que as estudadas nesta pesquisa, os autores indicam o maior incremento da RTF como função do tempo de cura e do

teor de cimento. Valores estes, que comparados com a presente pesquisa, apresentam-se um pouco superiores. É importante salientar que o tempo de cura utilizado pelo autor foi de 7 dias a mais que essa pesquisa, além do diferente tipo de cimento que tem uma característica de menor calor de hidratação em relação ao usado nessa pesquisa.

Já para Pitta (1998) um CCR com um consumo aproximado de 135 kg/m^3 deve ter propriedades típicas de resistência à tração na flexão de 2,5 MPa, onde os valores dessa pesquisa também não se enquadraram.

Os resultados alcançados por Paiva e Oliveira (2010) demonstraram que a resistência à tração é diretamente proporcional ao grau de compactação e que o emprego de maiores GCs acarretam em maiores resistências. Os autores indicam ainda que a adição de cimento pode não apresentar melhora no comportamento das misturas, caso essas não sejam compactadas o suficiente para promover o arranjo dos grãos, de forma a reduzir o volume de vazios das misturas.

Na pesquisa feita por Fedrigo (2015), os resultados dos ensaios mostraram que todas as variáveis analisadas afetam significativamente a resistência à tração. Em relação à energia de compactação aplicada observou-se que o aumento da energia de compactação permite compensar a utilização de teores mais baixos de cimento no que se refere às resistências à tração.

Lopez (2016) comparou os efeitos da energia de compactação e da variação de umidade na resistência à tração na flexão e concluiu que a energia de compactação tem um maior efeito do que a variação da umidade sobre a RTF.

Uma saída para as baixas resistências à tração na flexão deste estudo, seria a utilização de uma maior energia de compactação, o que ocasionaria um aumento de tais resistências, como os autores acima descreveram.

4.5 RELAÇÃO ENTRE RTCD E RCS

Nas Figuras 44 e 45 foram realizadas as relações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias de cura, a fim de verificar a existência de uma correlação significativa. Nas próprias figuras também é apresentado o modelo da RTCD em função da RCS. Assim, seria possível verificar valores de RTCD a partir da RCS de uma determinada mistura.

A Figura 44 demonstra que a correlação entre os resultados de RTCD e RCS para misturas de CCR é expressiva, já que o R^2 obtido foi de 0,89 para os 7 dias de cura. Pela

regressão linear pode-se observar outro fator que mostra uma evidência estatística de relação entre os resultados, o valor-p que teve um valor de 0,02, que mostra essa evidência pois se situa abaixo de 0,05. Na Figura 45 também é possível observar a forte relação entre as resistências aos 28 dias de cura, onde o R^2 foi ainda maior, sendo de 0,98, e o valor-p igual a 0,0015, que mostra uma forte evidência, pois chega muito próximo a zero.

Desta maneira, o modelo numérico que representa a relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples está disponibilizado nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 - Relação entre RTCD e RCS aos 7 dias de cura

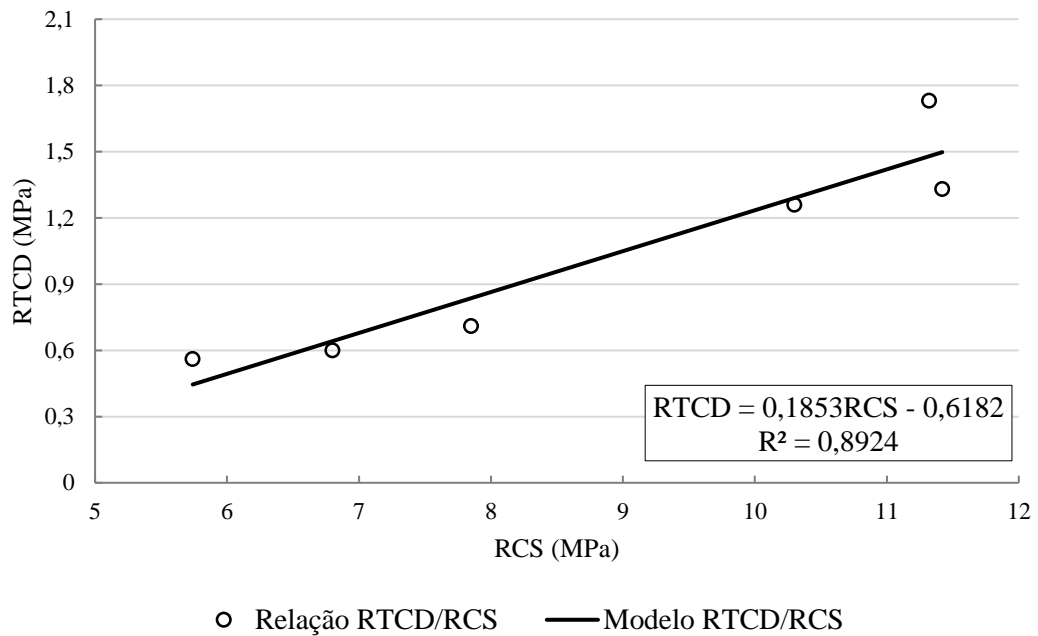
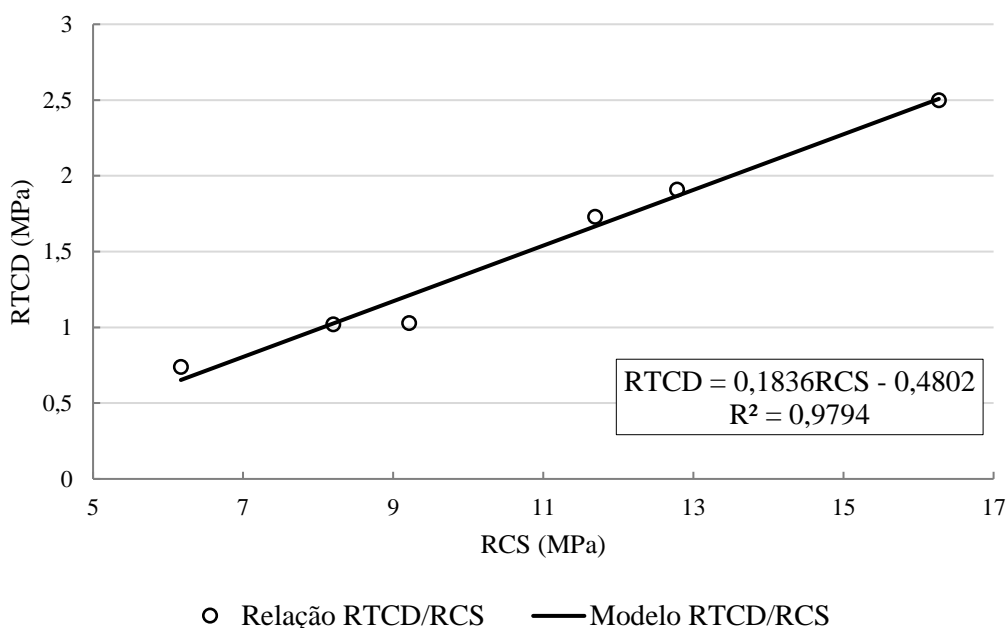


Figura 45 - Relação entre RTCD e RCS aos 28 dias de cura



Pelas relações obtidas entre RTCD/RCS seria possível verificar valores de RTCD a partir da RCS de uma determinada mistura. Recordando que, o modelo é válido apenas para misturas semelhantes às estudadas nesta pesquisa (tipo de cimento, agregados, energia de compactação). Em caso de haver alguma alteração, a correlação poderá não ser validada.

4.6 RELAÇÃO ENTRE RTF E RCS

Nas Figuras 46 e 47 foram realizadas as relações entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias de cura, a fim de verificar a existência de uma correlação significativa. Nas próprias figuras também é apresentado o modelo da RTF em função da RCS. Assim, seria possível verificar valores de RTF a partir da RCS de uma determinada mistura.

A Figura 46 demonstra que a correlação entre os resultados de RTF e RCS para misturas de CCR é expressiva, já que o R^2 obtido foi de 0,88 para os 7 dias de cura. Pela regressão linear pode-se observar outro fator que mostra uma evidência estatística de relação entre os resultados, o valor-p que teve um valor de 0,005, que mostra uma forte evidência, pois chega muito próximo a zero. Na Figura 47 também é possível observar a forte relação entre as resistências aos 28 dias de cura, onde o R^2 foi de 0,83, e o valor-p igual a 0,01, que mostra essa evidência pois se situa abaixo de 0,05.

Desta maneira, o modelo numérico que representa a relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples está disponibilizado nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Relação entre RTF e RCS aos 7 dias de cura

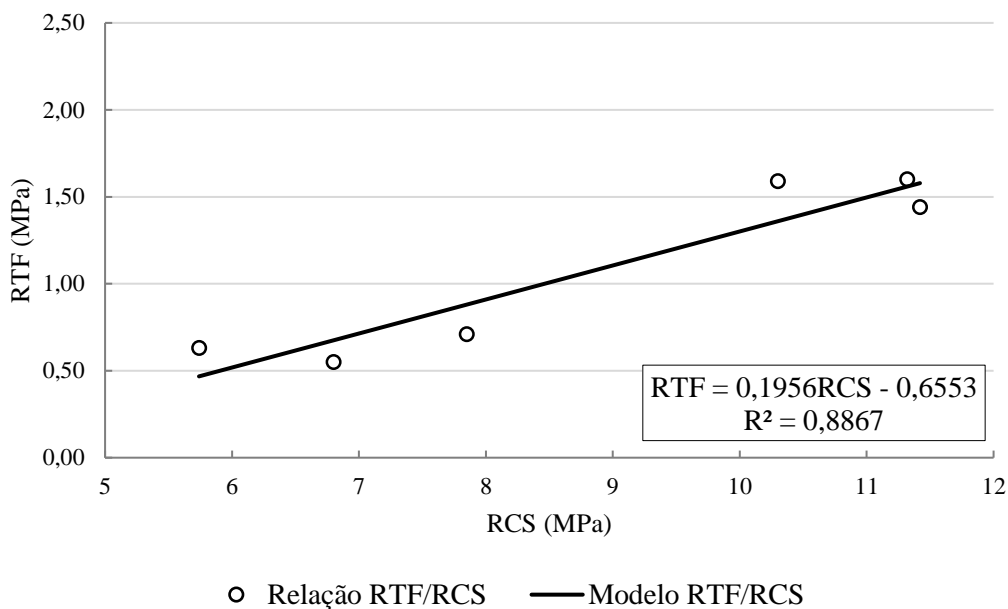
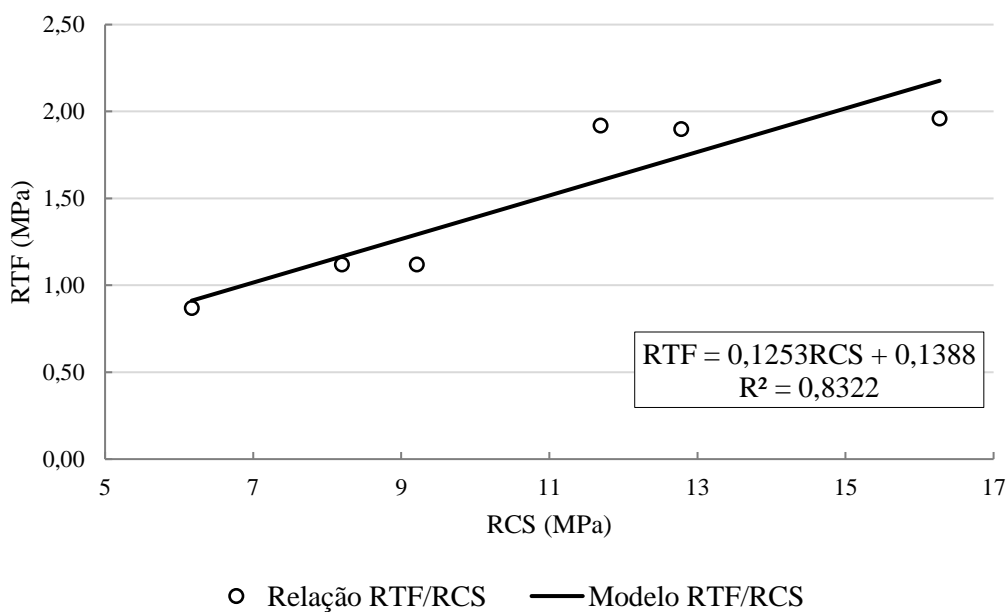


Figura 47 - Relação entre RTF e RCS aos 28 dias de cura



Ao realizar uma análise geral do que foi estudado, verifica-se que os melhores desempenhos foram apresentados pelas misturas CCR 150-0, CCR 150-10, CCR 150-30 que

atenderam a todos os critérios analisados, podendo ser aplicado em bases e sub-bases de pavimentos. Vale considerar que qualquer uma das misturas realizadas nesse estudo poderia ser aplicada, pois atenderiam os requisitos, se fossem submetidas a uma energia de compactação maior.

As resistências à compressão simples alcançadas foram bastante elevadas, variando entre 5 e 11,5 MPa, aos 7 dias e 6 a 16,5 MPa, aos 28 dias de cura. Todas as misturas apresentaram RCS maiores que a indicada pela norma DNIT 056/2004 – ES, que é 5 MPa aos 7 dias de cura. Os valores também se enquadraram nas recomendações de Godinho (1988) onde a RCS do CCR deve apresentar aos 28 dias de idade, valores entre 5 MPa e 8 MPa. Já para os outros ensaios de resistências não existem normas que indiquem valores mínimos para tais. Mas quando comparados aos resultados de outros autores, os valores localizam-se muito próximos.

Já para o ensaio de RTF de acordo com as instruções de projeto da prefeitura de São Paulo, IP 07/2004- Dimensionamento de pavimentos de concreto, as bases de concreto compactado com rolo, deverão apresentar um valor de resistência à tração na flexão igual ou superior a 1,5 MPa aos 28 dias, como aconteceu com todas as misturas com consumo de cimento de 150kg/m³ desta pesquisa. Já as misturas com consumo de cimento de 100 kg/m³ não alcançaram o valor mínimo indicado.

O estudo revelou o fresado como um material possível de ser utilizado em concretos compactados com rolo, para uso em bases e sub-bases de pavimentos, atingindo parâmetros exigidos e trazendo consigo a consciência de preservação do meio ambiente, já que reutiliza materiais oriundos de restaurações dos próprios pavimentos asfálticos. Está lançado um novo conceito de CCR que possibilitará a realizações de novos estudos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que até um certo ponto a substituição de agregados graúdos por material fresado asfáltico, age de forma positiva em relação as propriedades mecânicas do CCR, onde essas misturas podem ser aplicadas em bases de pavimentos tendo um bom desempenho, já que as propriedades apresentam comportamento semelhante ao observado em misturas de CCR convencionais.

A seguir são apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos para cada um dos ensaios experimentais realizados neste trabalho, considerando-se as variáveis investigadas e as análises realizadas.

Quanto à compactação e consumo de cimento:

- Os resultados obtidos a partir da compactação permitem afirmar que o aumento do consumo de cimento de 100 kg/m^3 para 150 kg/m^3 , levou ao aumento da massa específica aparente seca de todas as misturas, dando a entender que com mais cimento na pasta a mistura obteve menos vazios;
- Os ensaios de compactação mostraram que a substituição de 10% de fresado nas misturas de CCR provocou aumento nos valores de massa específica aparente seca tanto nas misturas com consumo de 100 kg/m^3 quanto nas misturas com consumo de 150 kg/m^3 , quando comparadas com as misturas sem fresado. Já a substituição de 30% de fresado provocou um aumento menos significativo na mistura com consumo de 100 kg/m^3 , e na mistura com consumo de 150 kg/m^3 o valor da massa específica caiu em relação a mistura de referência. Isso significa que quanto maior a substituição de fresado maior o número de vazios na mistura, causado pelos grumos do material fresado;
- Em relação a umidade ótima das misturas, aquelas contendo a substituição de 30% por fresado foram as que apresentaram maior umidade. Porém pode-se dizer que a variação da umidade ótima entre as misturas foi muito baixa, variando entre 5% e 6%;
- A variação das massas específicas aparentes secas desta pesquisa situou-se entre $2,188$ e $2,304 \text{ g/cm}^3$, mostrando-se valores indicados nas bibliografias existentes. Como para Pitta (1998) o CCR com um consumo de 135 kg/m^3 tem propriedades típicas de massa específica aparente máxima seca entre $2,15$ a $2,30 \text{ g/cm}^3$.

Quanto à resistência à compressão simples:

- Foram alcançadas resistências bastante elevadas, variando entre 5 e 11,5 MPa, aos 7 dias e 6 a 16,5 MPa, aos 28 dias de cura. Todas as misturas apresentaram RCS maiores que a indicada pela norma DNIT 056/2004 – ES, que é 5 MPa aos 7 dias de cura. Já para Godinho (1988) a RCS do CCR deve apresentar aos 28 dias de idade, valores entre 5 MPa e 8 MPa, o que também foi alcançado por todas as misturas;
- A resistência à compressão simples das misturas com fresado, nos ensaios de RCS, apresentou um aumento de resistência com a substituição de 10% de fresado, nas misturas com consumo de cimento de 100 kg/m^3 , quando comparadas às misturas de referência, mas um decréscimo quando a substituição aumentou para 30%. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a substituição de 10% praticamente se igualou ao CCR referência, na idade de 7 dia de cura, houve um decréscimo quando a substituição aumenta para 30%, já aos 28 dias de cura, a substituição de agregados graúdos por fresado influenciou negativamente em todas as misturas;
- Em uma comparação global, pode-se concluir que as maiores RCS das misturas aos 7 dias de cura, foram as que continham 10% de fresado. Os valores de RCS seguiram um padrão quando relacionadas as massas específicas aparentes secas, a mistura que obteve uma maior massa específica aparente seca foi a que teve a maior RCS. Já as misturas que continham 30% de fresado foram as que obtiveram menores valores de RCS, a qual pode ser atribuída, que quanto mais fresado maior a quantidade de grumos que são formados por material fino e ligante asfáltico causando um aumento da quantidade de poros nessa mistura, outro fator que pode contribuir para a baixa resistência, é a irregularidade na distribuição granulométrica dos agregados fresados, bem como por serem agregados fraturados devido às técnicas de remoção na pista.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral:

- As resistências obtidas a partir do ensaio de RTCD foram bastante elevadas, variando entre 0,5 e 1,73 MPa, aos 7 dias e 0,7 a 2,27 MPa, aos 28 dias de cura. Valores muito próximos encontrados por outros autores. Como os resultados obtidos por Sachet (2012), que foram para a idade de cura de 35 dias, variando entre 0,96 a 2,45 MPa. Valores estes, que comparados com a presente pesquisa, apresentam-se

um pouco superiores, mas é importante salientar que o tempo de cura utilizado pelo autor foi de 7 dias a mais que essa pesquisa, além de utilizar outro tipo de cimento;

- Em relação a influência do fresado, conclui-se que com um consumo de 100 kg/m^3 a substituição de 10% foi positiva em relação ao CCR referência, tendo sua resistência um pouco superior nas duas idades de cura, mas um decréscimo quando a substituição aumenta para 30%. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a substituição de agregados graúdos por fresado influenciou negativamente em todas as misturas. Porém pode-se dizer que essas influências são baixas;
- Pode-se concluir que a maior RTCD das misturas com consumo de 100 kg/m^3 foi a CCR 100-10, que continha 10% de fresado, tanto aos 7 como nos 28 dias. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a maior RTCD foi da mistura referência que não continha material fresado, à medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há uma diminuição do valor da resistência das mesmas;
- As variáveis que mais influenciaram na RTCD, foi o aumento do consumo de cimento e a idade de cura maior. A incorporação de 10% de fresado ocasionou um aumento na resistência, mas quando essa porcentagem aumenta as resistências caem.
- Os corpos de prova cilíndricos das misturas sem fresado, ensaiados à tração indireta, apresentaram fraturas do tipo abruptas e cônicas com separação do cilindro, caracterizadas pelo rompimento da argamassa. Entretanto, os CCR com incorporação de fresado apresentaram fraturas sutis, ou seja, os cilindros, na sua maioria, não se separaram e continuaram sustentando alguma carga após a fratura inicial. Isto se caracteriza pelo fato de que a ruptura se dá no meio do agregado fresado que já está fraturado antes de ser incorporado à mistura, ocorrido pela natureza da sua extração no campo, e pela característica visco-elástica do material fresado;
- Em relação a comparação dos resultados de RTCD em corpos de prova de dimensões diferentes, a variação dos resultados foi plenamente satisfatória, onde se obteve um valor máximo de 0,27 MPa, e uma média de variação de apenas 0,07 MPa, resultando em resistências muito próximas, podendo concluir que a execução do ensaio em CPs com dimensões menores é possível, sem que os resultados se diferenciem muito entre si.

Quanto à resistência à tração na flexão:

- As resistências obtidas a partir do ensaio de RTF não foram muito satisfatórias, variando entre 0,5 e 1,6 MPa, aos 7 dias e 0,87 a 1,96 MPa, aos 28 dias de cura. Valores abaixo dos encontrados por outros autores, como os resultados obtidos por Sachet (2012), que foram para a idade de cura de 35 dias, variando entre 2,37 a 4,23 MPa. Valores estes, que comparados com a presente pesquisa, apresentam-se um pouco superiores, mas é importante salientar que o tempo de cura utilizado pelo autor foi de 7 dias a mais que essa pesquisa, assim como o tipo de cimento utilizado foi diferente, onde tem como característica ter um menor calor de hidratação comparado ao cimento utilizado nessa pesquisa. Para Pitta (1998) o CCR com um consumo de 135 kg/m^3 tem propriedades típicas de resistência à tração na flexão de 2,5 MPa, onde os valores dessa pesquisa também não se enquadraram. Já de acordo com as instruções de projeto da prefeitura de São Paulo, IP 07/2004- Dimensionamento de pavimentos de concreto, as bases de concreto compactado com rolo, devem apresentar um valor de resistência à tração na flexão igual ou superior a 1,5 MPa aos 28 dias, como aconteceu com todas as misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 desta pesquisa. Já as misturas com consumo de cimento de 100 kg/m^3 não alcançaram o valor mínimo indicado.
- Aos 7 dias as duas misturas com consumo de 100 kg/m^3 com substituição de 10 e 30% do fresado tiveram suas RTF superiores a mistura de referência, mas quando aumentou-se o consumo de cimento para 150 kg/m^3 a mistura com 10% de fresado sofre uma queda em relação a mistura de referência, enquanto a mistura com 30% de fresado se iguala ao referência;
- Pode-se concluir que a maior RTF das misturas com consumo de 100 kg/m^3 foi a CCR 100-10, que continha 10% de fresado, tanto aos 7 como nos 28 dias. Já nas misturas com consumo de cimento de 150 kg/m^3 a maior RTF aos 7 dias de cura, foi da mistura referência, e aos 28 dias de cura também foi da mistura referência que não continha material fresado, à medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há uma diminuição do valor da resistência das mesmas;

Quanto à relação entre RTCD e RCS:

- A correlação entre os resultados de RTCD e RCS para misturas de CCR se mostrou expressiva, onde a RTCD está relacionada com a RCS, ou seja, a alteração no valor

de RCS provoca alterações no valor da RTCD, já que o R^2 obtido foi de 0,89 para os 7 dias de cura. Pela regressão linear, outro fator que mostra uma evidência estatística de relação entre os resultados, é o valor-p que teve um valor de 0,02, que mostra essa evidência pois se situa abaixo de 0,05. Para os 28 dias de cura também foi observado a forte relação entre as resistências, onde o R^2 foi ainda maior, sendo de 0,98, e o valor-p igual a 0,0015, que mostra uma forte evidência, pois chega muito próximo a zero.

Quanto à relação entre RTF e RCS:

- A correlação entre os resultados de RTF e RCS para misturas de CCR também se mostrou expressiva, já que o R^2 obtido foi de 0,88 para os 7 dias de cura e 0,83 para 28 dias de cura, o que mostra a forte evidência estatística de relação dos resultados pois, quanto mais próximo a 1 for o R^2 maior a relação.

Com base nas conclusões específicas para cada ensaio experimental tecidas acima, a seguir são apresentadas as conclusões gerais inferidas:

- Os ensaios de resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e à tração na flexão se mostraram eficientes para a caracterização das resistências mecânicas das misturas estudadas nesta pesquisa;
- Os ensaios evidenciaram que são obtidos elevados valores de resistências à compressão simples (7,85 MPa, aos 7 dias e 9,21 MPa, aos 28 dias) e à tração por compressão diametral (0,71 MPa, aos 7 dias e 1,05 MPa, aos 28 dias), já os valores de tração na flexão (0,71 MPa, aos 7 dias e 1,12 MPa, aos 28 dias) com consumo baixo de cimento (100 kg/m^3) ficaram abaixo do recomendado, apenas as misturas com consumo de 150 kg/m^3 atingiram o desejado. Vale lembrar que apenas a resistência não garante que a camada de CCR terá um bom desempenho para fadiga.
- Quando da análise de todas as resistências mecânicas, verifica-se que os melhores desempenhos foram das misturas CCR 150-0, CCR 150-10, CCR 150-30 pois tais misturas atenderam a todos os critérios analisados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema empregado na presente dissertação é bastante amplo, podendo ser verificado diferentes comportamentos, que não puderam ser abordados nessa pesquisa. Com isso, na sequência, são expostas algumas sugestões para estudos futuros:

- Estudar outros teores de substituições de fresado e cimento e avaliar seu comportamento;
- Avaliar diferentes tipos de energia de compactação para as mesmas misturas estudadas;
- Estudar misturas com outros tipos de cimento, para verificar sua influência.
- Refazer as misturas com exatamente as mesmas granulometrias, separando o fresado em peneiras para obter as mesmas curvas entre referência e mistura com fresado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. V. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. 2002. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 207.5R-89**: Roller compacted mass concrete, Manual of concrete practice, Materials and General Properties of Concrete, Part 1. (Reapproved 1997). 1998.
- _____. **ACI 325.10R-95**: state-of-the-art report on roller compacted concrete pavements. First Printing. 1995. 31 p.
- _____. **ACI Committee 327**: report on roller-compacted concrete pavements. publication 327.XR. 2004. 76 p.
- ANDRADE, W. P.; GAMBALE, E. A. **Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo**: Ensaios e Propriedades. 1. Ed. São Paulo: Editora Pini. 1997.
- ANDRIOLO, F. R. **Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado**. 1989, 303 p.
- ANDRIOLO, F. R. **The Use of Roller Compacted Concrete**. São Paulo: Oficina de Textos. 1998, 584 p.
- ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. **Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto**. São Paulo: Editora NEWSWORK. 1993. 572 p.
- ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- ARAÚJO, L. M. D; FARIAS, M. M; JÚNIOR, F. M. V. **Estudo de Propriedades Mecânicas de Material Fresado Visando Incorporação em Camadas de Base Rodoviária**. Alabama, 2001.
- ASSIS, V. J. D.; COSTA, C. R. V.; FERREIRA, H. C. Aplicação de ensaios não destrutivos para caracterização de concretos confeccionados a base de agregados convencionais e alternativos. In: 25ª Reunião Anual de Pavimentação, 1991, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 1991, p. 663 – 689.
- ASSOCIATION DES CONSTRUCTEURS DE ROUTES ET GRANDS TRAVAUX DU QUÉBEC (ACRGTQ). **Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec**. Canada, 119 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Controle Tecnológico da Obra das Marginais da Rodovia Castello Branco**, Relatório de Ensaio nº 15510, Laboratório e Suporte Tecnológico, São Paulo, 2001.

_____. **Pavimento de concreto: Controle Tecnológico da Qualidade da Camada de Concreto Rolado.** Prática recomendada – 2. 56 p. São Paulo, 2005.

_____. **Pavimento de concreto: tecnologia e aplicação no Brasil.** 2015. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2015/09/35Pavimento_concreto_Brasil_Ricardo_Moschetti_ABCP.pdf>. Acesso em 8 dez 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988. 10 p.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

_____. **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

_____. **NBR 9775:** Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011. 3 p.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

BALBO, J. T.; BODI, J. Reciclagem quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de elevado modulo de elasticidade. **Panorama nacional da pesquisa em transportes**, 18 ANPET. Florianopolis, SC, 2004.

BALBO, J. T. Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ABPv, 1996.

_____. Pavimentos asfálticos híbridos-rígidos: Perspectivas para baixos a elevados volumes de tráfego. In: 36º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 2005, Curitiba. **Anais...** Paraná RAPv, 2005.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. Petrobrás: Abeda, 2008.

BEZERRA, I. M. T. et al. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, n. 6, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662011000600015. Acesso em 06 out. 2015.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2007.

BRASIL. Prefeitura de São Paulo. **IP – 07/2004 - Dimensionamento de Pavimentos de Concreto**. São Paulo, 2004. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/INSTRU%C3%87%C3%95ES%20DE%20PROJETO/IP_07%5B1%5D.pdf. Acesso em: 2 jul. 2017.

BUCHER, H. R. E. **Método de dosagem de concreto pobre rolado para pavimentos**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1985. 55 p p. (Estudo técnico 77).

CANNON, R. W. **Air – entrained roller compacted concrete**, Concrete International, May, 1993.

CARVALHO, E. **Procedimento de Execução de Serviço: Execução de sub-base em concreto rolado**. Grupo de Serviço: Pavimentação. M&C Engenharia Ltda. Código: PES PAV 035. Versão: V1. 2002.

CARVALHO, M. D. de. Sub-base de CCR é preferência na pavimentação das rodovias brasileiras. **Grandes Construções**, São Paulo, n 71, p 44-45, jul. 2016. Disponível em: http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/PDFS/GC_71.pdf. Acesso em: 5 mai. 2017.

CERVO, T. C. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório**. 2016. Disponível em: [http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf) >. Acesso em 20 jul 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002**: dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: www.ibamapr.hpg.ig.com.br/30702RC.htm. Acesso em: 8 jul. 2017.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**. Ambiente Construído, v.9, 2009.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina 2001, 191 p.

DEL CARPIO, J. A.V. **Estudo da influência da adição da cinza de 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.

DELWAR, M.; FAHMY, M.; TAHA, R. Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete. **ACI Materials Journal**, Technical Paper, v. 94, nº3. p 251-256. 1997.

DÍAZ, P. S. H. **Parâmetros de Dosagem do Concreto Compactado a Rolo para Pavimentação.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Glossário de termos técnicos rodoviários.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **Manual de pavimentos de concreto rolado:** histórico, características tecnológicas, estado da arte, materiais, dosagem e normas pertinentes, v. 1. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **DNER – EM 037/97:** Agregado graúdo para concreto de cimento. 1997.

_____. **DNER – EM 038/97:** Agregado miúdo para concreto de cimento. 1997.

_____. **DNER – ME 035/98:** Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. 1998.

_____. **DNER – ME 083/98:** Agregados - análise granulométrica. 1998.

_____. **DNER – ME 084/95:** Agregado miúdo - determinação de densidade real. 1995.

_____. **DNER – ME 089/94:** Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. 1994.

_____. **DNER – ME 092/94:** Solo - determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia. 1994.

_____. **DNER – ME 152/95:** Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. 1995.

_____. **DNER – ME 194/98:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. 1998.

_____. **DNER – ME 195/97:** Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. 1997.

_____. **DNER – ME 266/97:** Agregados - determinação do teor de materiais pulverulentos. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos.** 2. ed. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro. 2004.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** 2 ed. Rio de Janeiro. 2006.

_____. **DNIT 031/2006-ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **DNIT 056/2004-ES:** Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2004. 8 p.

_____. **DNIT 059/2004-ES:** Pavimento rígido – Pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2004. 11 p.

FAKHRI, M.; AMOOSOLTANI, E. The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. **Materials & Design.** v 137, p 470-484, abr. 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817301630>. Acesso em: 11 jul. 2017.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures:** State of the Practice. 2011. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/11021.pdf> . Acesso em: 1 jul, 2017.

_____. **Pavement recycling guidelines for state and local governments:** Technical Report No. FHWA-AS-98-042. Washington, 301 p. 1997.

FEDRIGO, W. **Estudo de dosagem de ccr aplicado na execução de bases de pavimentos.** 2012. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Civil)-Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland: definição das bases para um método de dosagem.** 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FOLETTTO, E. L. et al. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** Química Nova, Vol. 28, No. 6, 2005.

FONSECA, P. **Engenharia e Pavimento, LTDA.** 2009. Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem>>. Acesso em: 24/04/2017.

FUJIMURA, F. et al. O Uso de Finos de Pedreira de Rochas Gnáissicas e Graníticas em Substituição às Áreas Naturais. **Anais...** 29º Reunião Anual de Pavimentação. V 1. Cuiabá, MT, 1995. p 146 – 151.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **CCR – Preparação em Laboratório**. Manual da Qualidade. Sistema de Gestão da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. E 01. 2002.

GODINHO, D. P. **Características tecnológicas do concreto rolado de pavimentação: experiência brasileira**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1988.

GOMEZ, J. D. **Roller Compacted Concrete for Highway Applications**. PhD dissertation. Purdue University. 1987.

GRAÇA, N. G. et al. A influência do Grau de Compactação nas Propriedades do Concreto Compactado com Rolo. **Anais...**In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Vol.II: construção em concreto. IBRACON. Florianópolis, 2004. 6 p.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação (mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989, 147 pp.

HOSSINEY, N.; WANG, G.; TIA, M.; BERGIN, M. J. Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement. **TRB Annual Meeting** – Transportation Research Record. 13p. 2008.

HUANG, B.; SHU, X., LI, G. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **Science Direct – Cement and Concrete Research**. v. 35. p 2008-2013. 2005.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR**. 2015. Disponível em: < <http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safras>>. Acesso em 25 nov 2015.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Presas de Hormigón compactado**. III Curso de presas de hormigón compactado, Madrid, 1996.

ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**, Livro, Ibracon, 2005.

ISOLA, M. et al. Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 238-247, 2013.

JOFRÉ, C. et al. **Roller compacted concrete pavements for motorways and main highways: the Spanish practice**. In: VI Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Proceedings: Tema S. Madrid. 1990. p.155 – 165.

JOFRÉ, C. et. al. **RCC pavements in Spain**. International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Proceedings., West Lafayette, Purdue University, 1989.

KANDHAL, P. **Recycling of Asphalt Pavements-an Overview**. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT, USA, vol. 66, 1997.

KIM, Y. S. **Roller-compacted concrete shoulder construction on interstate highway in Georgia**. In: Journal of the Transportation Research Board. 2007. p. 71 – 79.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem.** 2016. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

KOMLOS, K. et al. **Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards.** In: 18 Cement and Concrete Composites. Grã-Bretanha. 1996. p.357 – 364.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos.** 2016. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARCHAND, J. et al. **Air entrainment in no-slump mixes,** Concrete International, 1998.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerai s Usados na Pavimentação Asfáltica.** 1º Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MATHIAS, V.; SEDRAN, T.; LARRAD, F. Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads. In: Internacional RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. **Proceedings.** Ed. RILEM Publications SARL, 2004. p.66-75.

METHA, P. K. **Husk ash – a unique supplementary cementig material.** In: Malhotra, V.M. (ed) Advances in concrete technology. CANMET, Ottawa. 1992. p.407-432.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais,** Ed. PINI, São Paulo, 1994.

MODARRES, A.; HOSSEINI, Z. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. **Materials & Design.** v 64, p 227-236, dez. 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914006049>. Acesso em: 11 jul. 2017.

MOLINA, J. E. **Adicion de Ceniza de cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con Rodillo.** Tesis de grado, Escuela Superior Politecnica del Litoral Ecuador, 2002, 78 pp.

MOREIRA, J. P. V.; GOMES CORREIA, A.; PEREIRA, P. Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento. In: 10º CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA - **Geotecnia multidisciplinar: estudos,** Lisboa, v. 2, p. 439-448, 2006.

NAIR, D. G. et al. **A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice rusk ashes.** Cement and Concrete Research, v.40, 2008.

NANNI, A. et al. **Roller compacted concret for highway pavements.** Concrete International, p.33 – 38, 1996.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. Longman, England, 1997.

NUNES, A. S. N.; MULLER, E. R.; DALLA ROSA, F. Estudo da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland. In: VII SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL – **Anais...** Santa Maria, 2013. 6 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. A importância do controle de compactação no desempenho da camada reciclada com cimento Portland. In: 4º CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **Anais...** São Paulo, 2010. 16 p.

PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. J. M. Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. **Boletim Técnico BT/PCC/43**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1991.

PCA. **Guide Specification for Construction of Roller Compacted Concrete Pavements**. Portland Cement Association. 2004. 08 p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Pórtland**. 8ª Edição atualizada e revisada. Editora Globo, 1981.

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

PIRES, G. M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos**. 2014. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PITTA, M. R.; DÍAZ, P. H. Estado del arte de pavimentos de concreto compactado con rodillo. **Anais...** In: 25ª Reunión Anual de Pavimentación. São Paulo. 1991. p.605 – 634.

PITTA, M. R. **Concreto Rolado: Uma Solução Econômica e Durável para a Pavimentação Urbana**. Seminário Técnico Sobre Pavimentação Urbana à Base de Cimento. São Paulo, 2002.

PITTA, M. R. **Estado del arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo** ASOCEM, 1994.

PITTA, M. R. et al. Estado-del-Arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo. In: 1º Simpósio de obras de concreto compactado com rolo, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1995. p.535 – 61.

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

PITTMAN, D. W. **Construction of Roller Compacted Concrete Pavements**. TRR 1062. 1986. p. 12 – 32.

PITTMAN, D. W.; RAGAN, S. A. **Drying shrinkage of roller compacted concrete for pavement applications**. ACI Materials Journal, Detroit, v. 95, n.1, 1998.

QUEIROZ, F. de A. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários.** 2011. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SACHET, T. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SANTOS, F. O. **Hormigón compactado con rodillo.** In: Revista de Obras Públicas. 1988. p.959 – 975.

SETTARI, C.; BOUKENDAKDJI, O. Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. **Materials & Design.** v 101, p 617-621, dez. 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815304591>. Acesso em: 11 jul. 2017.

SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SINGH, S.; KUMAR, P. An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. **Materials & Design.** v 148, p 734-747, set. 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817309224>. Acesso em: 11 jul. 2017.

SUFIAN, Z. et al. Full depth reclaimed pavements using cement and hydrated lime as stabilizing agents. In: 13th CONFERENCE OF ROAD ENGINEERING ASSOCIATION OF ASIA AND AUSTRALASIA – **Anais...** Incheon, 2009. 10 p.

TAHA, R. et al. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 239 – 245, 2002.

TANGO, C. E. S. **Fundamentos de dosagem do concreto para blocos estruturais.** 5º International Seminar on Structural Masonary for Developing Countries. Florianópolis, Brazil. 1994.

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

TRICHÊS, G. et al. Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: 42ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Gramado, 2013. 13 p.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Roller compacted concrete pavement, design and construction.** Estados Unidos, 1995.

WHITE, T. D. **Mix Design, Thickness Design, and Construction of Roller Compacted Concrete Pavement.** TRR 1062. 1986. p 1 – 6.